- En el análisis de circuitos se suele suponer que los alambres tienen una resistencia nula. Sin embargo, cuando se elige un calibre de alambre para una aplicación específica, es necesario consultar códigos locales eléctricos y contra incendios. (Ejemplo 2.4)

LECTURAS ADICIONALES

Un buen libro que estudia con una gran profundidad las propiedades y fabricación de resistencias es:

Felix Zandman, Paul-René Simon y Joseph Szwarc, *Resistor Theory and Technology,* Raleigh, N.C.: SciTech Publishing, 2002.

Un buen manual de ingeniería eléctrica para todo propósito es:

Donald G. Fink y H. Wayne Beaty, *Standard Handbook for Electrical Engineers,* 13a. edición, Nueva York: McGraw-Hill,1993.

En particular las páginas 1-1 a 1-51, 2-8 a 2-10 y 4-2 a 4-207 proporcionan un tratamiento detallado de temas relacionados con los que se estudiaron en este capítulo.

Una referencia detallada del SI se encuentra disponible en internet en el Instituto Nacional de Estándares:

Ambler Thompson y Barry N. Taylor, *Guide for the Use of the International System of Units (SI),* NIST Special Publication 811, edición 2008, www.nist.gov.

EJERCICIOS

2.1 Unidades y escalas

1. Convierta lo siguiente a notación de ingeniería:
   (*a*) 0.045 W (*b*) 2 000 pJ
   (*c*) 0.1 ns (*d*) 39 212 as
   (*e*) 3 Ω (*f*) 18 000 m
   (*g*) 2 500 000 000 000 bits (*h*) 10^{15} átomos/cm^3
2. Convierta lo siguiente a notación de ingeniería:
   (*a*) 1 230 fs (*b*) 0.0001 decímetros
   (*c*) 1 400 mK (*d*) 32 nm
   (*e*) 13 560 kHz (*f*) 2 021 micromoles
   (*g*) 13 decilitros (*h*) 1 hectómetro
3. Exprese lo siguiente en unidades de ingeniería:
   (*a*) 1 212 m V (*b*) 10^{11} pA
   (*c*) 1 000 yoctosegundos (*d*) 33.9997 zeptosegundos
   (*e*) 13 100 attosegundos (*f*) 10^{-14} zettasegundos
   (*g*) 10^{-5} segundos (*h*) 10^9 Gs
4. Exprese en metros las siguientes distancias:
   (*a*) 1 Zm (*b*) 1 Em (*c*) 1 Pm
   (*d*) 1 Tm (*e*) 1 Gm (*f*) 1 Mm
5. Convierta lo siguiente a unidades SI, teniendo cuidado de emplear la notación de ingeniería correcta:
   (*a*) 212 °F (*b*) 0 °F (*c*) 0 K
   (*d*) 200 hp (*e*) 1 yarda (*f*) 1 milla

6. Convierta lo siguiente a unidades SI, teniendo cuidado de emplear la notación de ingeniería correcta:

(*a*) 100 °C (*b*) 0 °C (*c*) 4.2 K

(*d*) 150 hp (*e*) 500 Btu (*f*) 100 J/s

7. Cierto láser de fluoruro de kriptón genera pulsos con longitud de 15 ns, y cada pulso contiene 550 mJ de energía. (*a*) Calcule la potencia pico de salida instantánea del láser. (*b*) Si se pueden generar hasta 100 pulsos por segundo, calcule la potencia promedio máxima generada por el láser.

8. Cuando se opera con una longitud de onda de 750 nm, cierto láser de Ti:zafiro es capaz de producir pulsos tan cortos como de 50 fs, cada uno con un contenido de energía de 500 μJ. (*a*) Calcule la potencia instantánea de salida del láser. (*b*) Si el láser es capaz de una rapidez de repetición de pulsos de 80 MHz, calcule la potencia promedio máxima de salida que se puede obtener.

9. Un vehículo eléctrico es propulsado por un solo motor cuya potencia nominal es de 40 hp. Si el motor trabaja continuamente durante 3 h a potencia máxima, calcule la energía eléctrica consumida. Exprese su respuesta en unidades SI usando notación de ingeniería.

10. En condiciones de insolación de 500 W/m^2 (luz de sol directa) y eficiencia de cada celda solar de 10% (definida como la relación entre la potencia eléctrica generada y la potencia solar incidente), calcule el área necesaria para que una red fotovoltaica de celdas solares sea capaz de hacer funcionar el vehículo del ejercicio 9 a media potencia.

11. Cierto generador de piezoelectricidad de nanoalambre es capaz de producir 100 pW de electricidad utilizable a partir del tipo de movimiento que se obtiene del trote de una persona a paso moderado. (*a*) ¿Cuántos dispositivos de nanoalambre se necesitan para operar un reproductor personal MP3 que consume 1 W de potencia? (*b*) Si se pueden producir los nanoalambres directamente en un trozo de tela con una densidad de 5 dispositivos por micra cuadrada, ¿qué área se necesita?; ¿sería práctico?

12. Una compañía de suministro eléctrico hace cargos a sus clientes a tarifas diferentes, dependiendo de su consumo diario de energía: $0.05/kWh hasta 20 kWh, y $0.10/kWh para todo consumo de energía por encima de 20 kWh en cualquier periodo de 24 horas. (*a*) Calcule cuántas bombillas de iluminación de 100 W se pueden usar continuamente por menos de $10 por semana. (*b*) Calcule el costo diario de energía si se usan continuamente 2 000 kW de potencia.

13. La Tilting Windmill Electrical Cooperative LLC, Inc., ha instituido un esquema de precios diferenciados que tiene por objetivo animar a los clientes a ahorrar en el uso de energía durante las horas de luz de día, cuando la demanda comercial local está en su máximo. Si el precio por kilowatt-hora es de $0.033 entre las 9 p.m. y las 6 a.m., y de $0.057 para el resto de las horas, ¿cuánto cuesta hacer funcionar un calefactor portátil de 2.5 kW continuamente durante 30 días?

14. Suponiendo una población mundial de 9 000 millones de personas, cada una de las cuales usa aproximadamente 100 W de potencia continuamente durante el día, calcule el área total de terreno que tendría que reservarse para la generación fotovoltaica de potencia, suponiendo 800 W/m^2 de potencia solar incidente y una eficiencia de conversión (luz solar a electricidad) de 10%.

2.2 Carga, corriente, tensión (voltaje) y potencia

15. Se determina que la carga total que sale de un extremo de un pequeño alambre de cobre y entra a un dispositivo desconocido sigue la relación $q(t) = 5e^{-t/2}$ C, donde t se expresa en segundos. Calcule la corriente que entra al dispositivo, indicando el signo.

16. La corriente que entra a la terminal del colector de cierto transistor de unión bipolar (BJT) se mide como 1 nA. Si no se ha transferido carga alguna hacia o desde la terminal del colector antes de $t = 0$, y la corriente fluye durante 1 min, calcule la carga total que cruza hacia el colector.

17. La carga total almacenada en una placa aislante de 1 cm de diámetro es de -10^{13} C. (*a*) ¿Cuántos electrones están sobre la placa? (*b*) ¿Cuál es la densidad superficial de los electrones (número de electrones por metro cuadrado)? (*c*) Si se agregan electrones adicionales a la

placa de una fuente externa a razón de 10^6 electrones por segundo, ¿cuál es la magnitud de la corriente que fluye entre la fuente y la placa?

18. Un misterioso dispositivo que se encontró en un laboratorio olvidado acumula carga con una rapidez especificada por la expresión $q(t) = 9 - 10t$ C desde el momento en que se pone en acción. (*a*) Calcule la carga total contenida en el dispositivo cuando $t = 0$. (*b*) Calcule la carga total contenida cuando $t = 1$ s. (*c*) Determine la corriente que fluye hacia el dispositivo cuando $t = 1$ s, 3 s y 10 s.

19. Un nuevo tipo de dispositivo parece acumular carga de acuerdo con la expresión $q(t) = 10t^2 - 22t$ mC (t en s). (*a*) En el intervalo $0 \leq t < 5$ s, ¿en qué tiempo la corriente que fluye hacia el dispositivo es igual a cero? (*b*) Grafique $q(t)$ e $i(t)$ en el intervalo $0 \leq t < 5$ s.

20. Se determina que la corriente que fluye a través de una bombilla de luz de filamento de tungsteno sigue $i(t) = 114$ sen $(100\pi t)$ A. (*a*) En el intervalo definido por $t = 0$ y $t = 2$ s, ¿cuántas veces la corriente es igual a cero amperes? (*b*) ¿Cuánta carga se transporta a través de la bombilla en el primer segundo?

21. La forma de onda de corriente que se describe en la figura 2.27 se caracteriza por un periodo de 8 s. (*a*) ¿Cuál es el valor promedio de la corriente durante un solo periodo? (*b*) Si $q(0) = 0$, grafique $q(t)$, $0 < t < 20$ s.

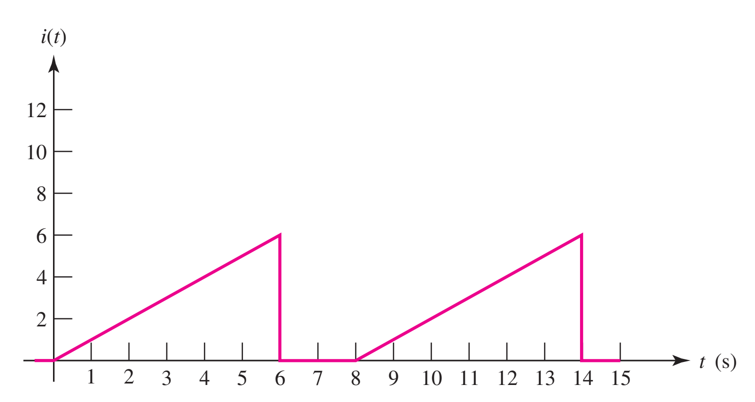


FIGURA 2.27 Un ejemplo de una corriente variable con el tiempo.

22. La forma de onda de corriente que se describe en la figura 2.28 se caracteriza por un periodo de 4 s. (*a*) ¿Cuál es el valor promedio de la corriente a lo largo de un solo periodo? (*b*) Calcule la corriente promedio a lo largo del intervalo $1 < t < 3$ s. (*c*) Si $q(0) = 1$ C, grafique $q(t)$, $0 < t < 4$ s.

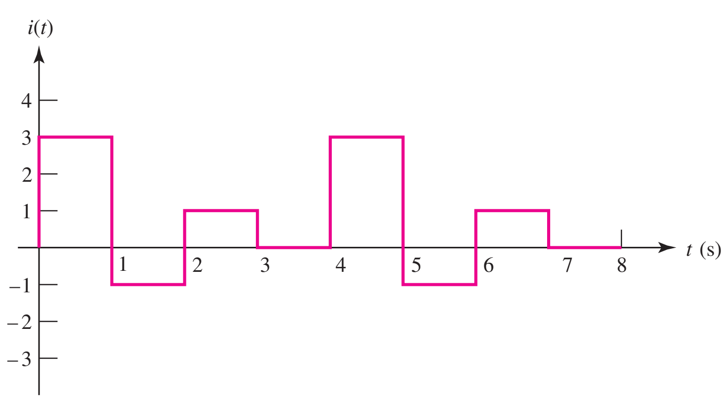


FIGURA 2.28 Un ejemplo de una corriente variable con el tiempo.

23. Una trayectoria alrededor de cierto circuito eléctrico tiene puntos discretos llamados *A*, *B*, *C* y *D*. Para mover un electrón del punto *A* al *C* se necesitan 5 pJ. Para mover un electrón de *B* a *C* se necesitan 3 pJ. Para mover un electrón de *A* a *D* se necesitan 8 pJ. (*a*) ¿Cuál es la diferencia de potencial (en volts) entre los puntos *B* y *C*, suponiendo una referencia "+" en *C*? (*b*) ¿Cuál es la diferencia de potencial (en volts) entre los puntos *B* y *D*, suponiendo una referencia "+" en *D*? (*c*) ¿Cuál es la diferencia de potencial (en volts) entre los puntos *A* y *B* (nuevamente en volts), suponiendo una referencia "+" en *B*?

24. Dos terminales metálicas sobresalen de un dispositivo. La terminal izquierda es la referencia positiva para una tensión llamada v_x (la otra terminal es la referencia negativa). La terminal de la derecha es la referencia positiva para una tensión llamada v_y (la otra terminal es la referencia negativa). Si se necesita 1 mJ de energía para empujar un solo electrón hacia la terminal izquierda, determine las tensiones v_x y v_y.

25. La convención para los voltímetros es usar un alambre negro para la terminal de referencia negativa y uno rojo para la terminal de referencia positiva. (*a*) Explique por qué se necesitan dos alambres para medir una tensión. (*b*) Si por trabajar en la oscuridad se invierten accidentalmente los alambres en un voltímetro, ¿qué sucederá durante la siguiente medición?

26. Determine la potencia absorbida por cada uno de los elementos en la figura 2.29.

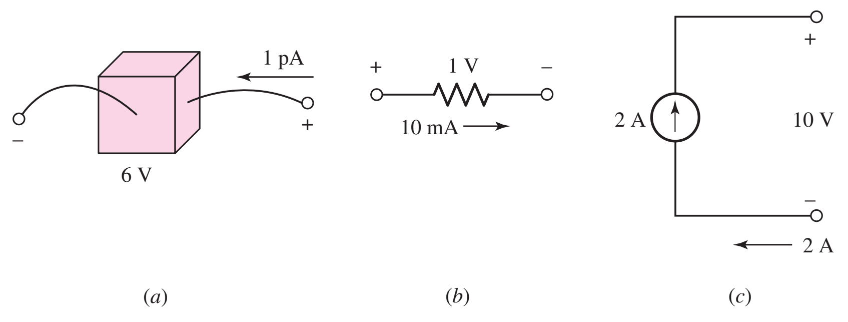


FIGURA 2.29 Elementos para el ejercicio 26.

27. Determine la potencia absorbida por cada uno de los elementos en la figura 2.30.

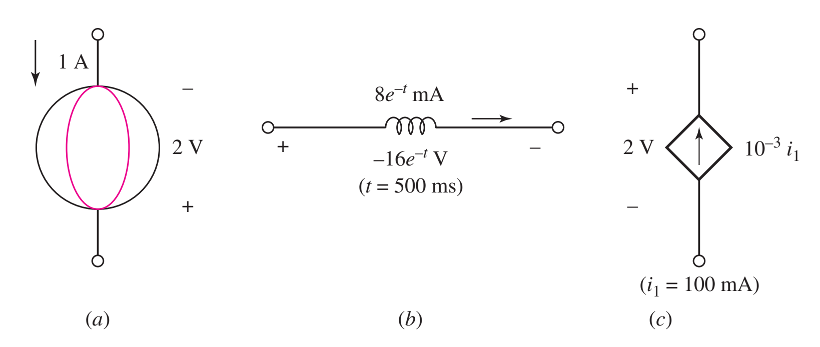
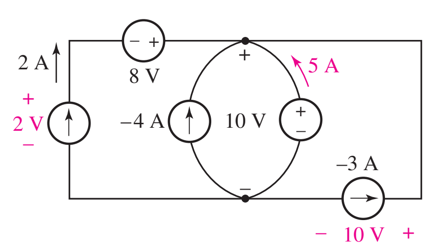


FIGURA 2.30 Elementos para el ejercicio 27.

28. Se mide una corriente constante de 1 ampere que fluye hacia la terminal de referencia positiva de un par de conductores, cuya tensión se llamará v_p. Calcule la potencia absorbida cuando $t = 1$ s, si $v_p(t)$ es igual (*a*) +1 V; (*b*) −1 V; (*c*) $2 + 5\cos(5t)$ V; (*d*) $4e^{-2t}$ V. (*e*) Explique el significado de un valor negativo para la potencia absorbida.

29. Determine la potencia suministrada por el elemento del extremo izquierdo en el circuito de la figura 2.31.



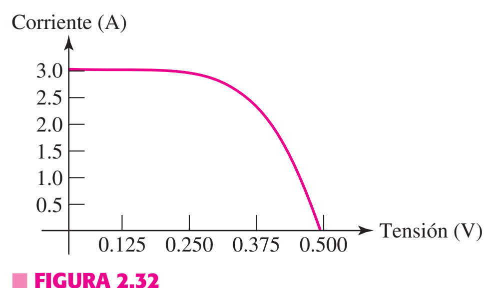
■ **FIGURA 2.31**

30. La característica corriente-tensión de una celda solar de silicio expuesta a la luz solar directa a medio día en Florida a mediados de verano se da en la figura 2.32. Se obtiene colocando resistencias de diferentes tamaños entre las dos terminales del dispositivo y midiendo las corrientes y las tensiones resultantes.

(*a*) ¿Cuál es el valor de la corriente de cortocircuito?

(*b*) ¿Cuál es el valor de la tensión circuito abierto?

(*c*) Estime la potencia máxima que se puede obtener del dispositivo.



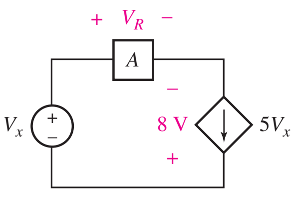
■ **FIGURA 2.32**

2.3 Fuentes de tensión y de corriente

31. Algunas de las fuentes ideales en el circuito de la figura 2.31 están suministrando potencia positiva, y las otras están absorbiendo potencia positiva. Determine cuáles son cuáles, y demuestre que la suma algebraica de la potencia absorbida para cada elemento (teniendo cuidado de conservar los signos) es igual a cero.

32. Mediante medición cuidadosa, se determina que un láser de mesa de ion de argón está consumiendo (absorbiendo) 1.5 kW de potencia eléctrica de la toma de corriente de la pared, pero únicamente produce 5 W de potencia óptica. ¿A dónde va la energía restante? ¿La conservación de la energía no requiere que ambas cantidades sean iguales?

33. Con referencia al circuito representado en la figura 2.33 vea que la misma corriente fluye a través de cada elemento. La fuente dependiente controlada por la tensión suministra una corriente que es 5 veces superior a la tensión V_x. (*a*) Para $V_R = 10$ V y $V_x = 2$ V, determine la potencia absorbida por cada elemento. (*b*) ¿El elemento *A* es una fuente pasiva o activa? Explique.



■ **FIGURA 2.33**

34. En la figura 2.33, observe que la misma corriente fluye a través de cada elemento. La fuente controlada por tensión suministra una corriente que es 5 veces superior que la tensión V_x. (*a*) Para $V_R = 100$ V y $V_x = 92$ V, determine la potencia suministrada por cada elemento. (*b*) Verifique que la suma algebraica de las potencias suministradas es igual a cero.

35. El circuito representado en la figura 2.34 contiene una fuente dependiente de corriente; la magnitud y el sentido de la corriente que suministra están directamente determinados por la tensión etiquetada como v_1. Observe que, por lo tanto, $i_2 = -3v_1$. Determine la tensión v_1 si $v_2 = 33i_2$ y si $i_2 = 100$ mA.

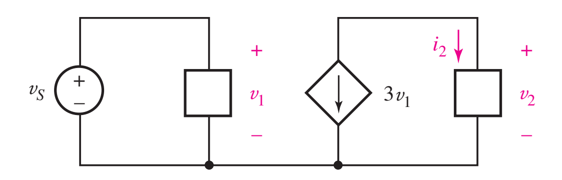


FIGURA 2.34

36. Para proteger un costoso componente de un circuito contra el riesgo de que se le suministre demasiada potencia, usted decide incorporar en el diseño un fusible de ruptura rápida. Sabiendo que el componente de circuito está conectado a 12 V, su consumo mínimo de potencia es de 12 W y la potencia máxima que puede disipar con seguridad es de 100 W, ¿cuál de las tres clasificaciones disponibles de fusible seleccionaría: 1 A, 4 A o 10 A? Explique su respuesta.

37. La fuente dependiente en el circuito de la figura 2.35 suministra una tensión cuyo valor depende de la corriente i_x. ¿Qué valor de i_x se necesita para que la fuente dependiente suministre 1 W?

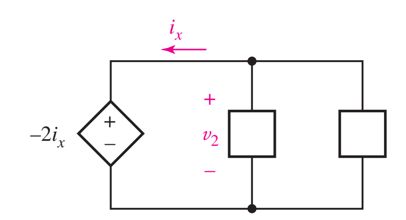


FIGURA 2.35

2.4 Ley de Ohm

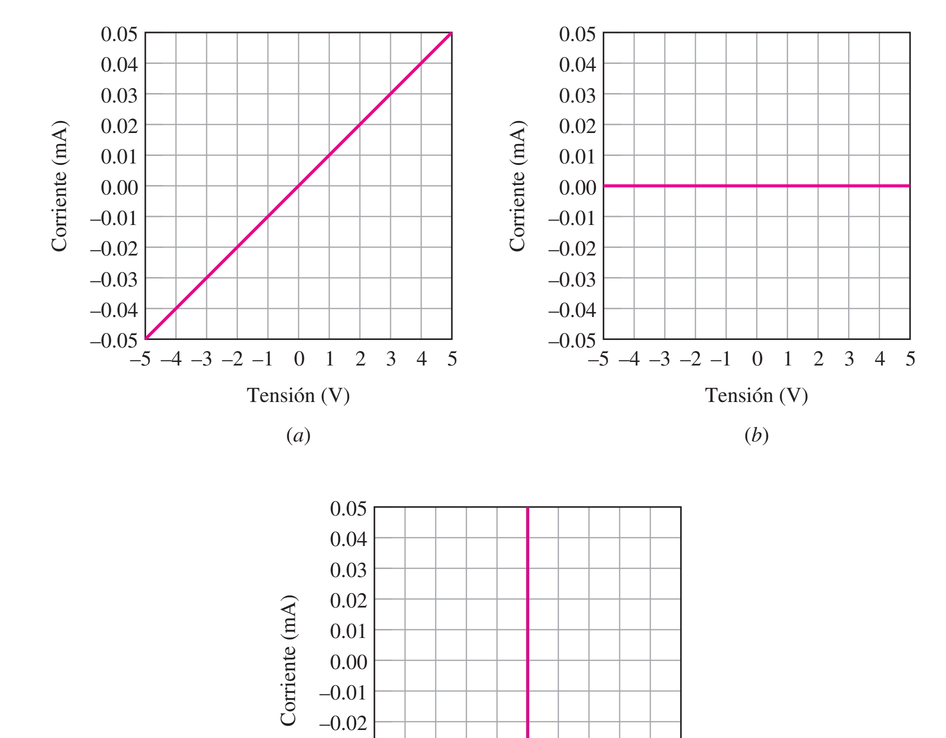
38. Determine la magnitud de la corriente que fluye a través de una resistencia de 4.7 kΩ si la tensión a través de éste es (*a*) 1 mV; (*b*) 10 V; (*c*) 4 e^{-t} V; (*d*) 100 cos(5 *t*) V; (*e*) −7 V.

39. Las resistencias reales se pueden fabricar únicamente con una tolerancia específica, de modo que en realidad el valor de la resistencia es incierto. Por ejemplo, una resistencia de 1 Ω especificada con 5% de tolerancia podría en la práctica tener cualquier valor comprendido entre 0.95 y 1.05 Ω. Calcule la tensión a través de una resistencia de 2.2 kΩ con tolerancia de 10% si la corriente que fluye a través del elemento es (*a*) 1 mA; (*b*) 4 sen 44*t* mA.

40. (*a*) Grafique la relación corriente-tensión (corriente en el eje *y*) de una resistencia de 2 kΩ dentro del rango de tensión de $-10\text{ V} \leq V_{\text{resistencia}} \leq +10\text{ V}$. Asegúrese de etiquetar adecuadamente ambos ejes. (*b*) ¿Cuál es el valor numérico de la pendiente (exprese su respuesta en siemens)?

41. Grafique la tensión a través de una resistencia de 33 Ω dentro del rango $0 < t < 2\pi$s, si la corriente está dada por 2.8 cos(*t*) A. Suponga que tanto la corriente como la tensión están definidos de acuerdo con la convención pasiva de signos.

42. La figura 2.36 representa la característica corriente-tensión de tres diferentes elementos resistivos. Determine la resistencia de cada uno, suponiendo que la tensión y la corriente están definidas de acuerdo con la convención pasiva de signos.

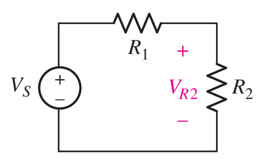


■ **FIGURA 2.36**

43. Determine la conductancia (en siemens) de lo siguiente: (*a*) 0 Ω; (*b*) 100 MΩ; (*c*) 200 mΩ.
44. Determine la magnitud de la corriente que fluye a través de una conductancia de 10 mS si la tensión a través de ésta es (*a*) 2 mV; (*b*) −1 V; (*c*) $100e^{-2t}$ V; (*d*) 5 sen(5*t*) V; (*e*) 0 V.
45. Una resistencia de 1 kΩ a 1% de tolerancia puede tener en realidad cualquier valor dentro del rango de 990 a 1 010 Ω. Suponiendo que se aplica una tensión de 9 V a través de ella, determine (*a*) el rango correspondiente de corriente y (*b*) el rango correspondiente de potencia absorbida. (*c*) Si la resistencia se reemplaza por otra de 1 kΩ a 10% de tolerancia, repita los incisos (*a*) y (*b*).
46. Los siguientes datos experimentales se obtienen de una resistencia sin marcar, usando una fuente de potencia de tensión variable y un medidor de corriente. El indicador del medidor de corriente es algo inestable, desafortunadamente, lo cual introduce error en la medición.

Tensión (V)	Corriente (mA)
−2.0	−0.89
−1.2	−0.47
0.0	0.01
1.0	0.44
1.5	0.70

(*a*) Grafique la característica de corriente contra tensión medidos.
(*b*) Usando una línea de ajuste óptimo, estime el valor de la resistencia.



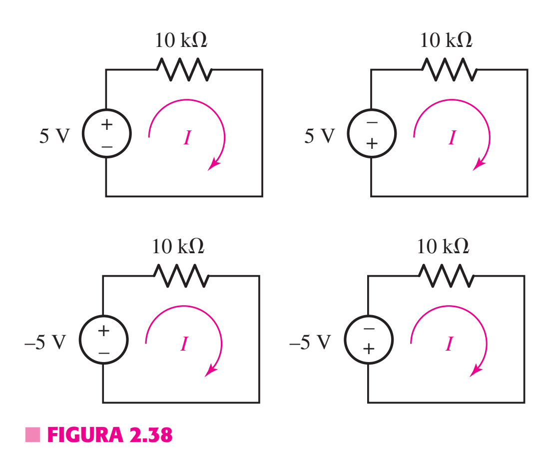
■ **FIGURA 2.37**

47. Utilice el hecho de que, en el circuito de la figura 2.37, la potencia total suministrada por la fuente de tensión debe ser igual a la potencia total absorbida por las dos resistencias para demostrar que

$$V_{R_2} = V_S \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Usted puede suponer que fluye la misma corriente a través de cada elemento (un requisito de la conservación de cargas).

48. Para cada uno de los circuitos de la figura 2.38, encuentre la corriente I y calcule la potencia absorbida por la resistencia.



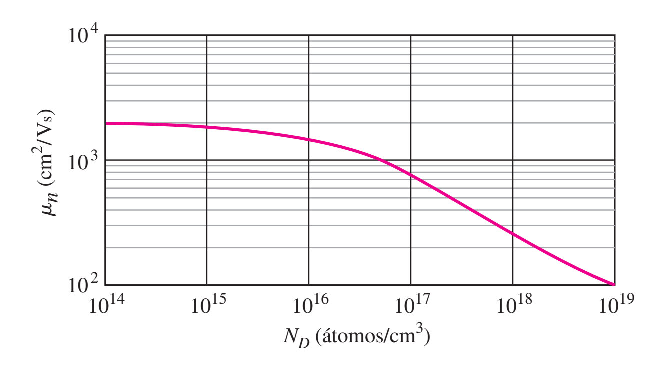
■ **FIGURA 2.38**

49. Grafique la potencia absorbida por una resistencia de 100 Ω como función de la tensión dentro del rango de $-2\text{ V} \le V_{\text{resistencia}} \le +2\text{ V}$.

Ejercicios de integración del capítulo



50. El silicio conocido como "tipo n" tiene una resistividad dada por $\rho = (-q\,N_D\mu_n)^{-1}$, donde N_D es la densidad volumétrica de los átomos de fósforo (átomos/cm^3), μ_n es la movilidad de los electrones (cm^2/V · s), y $q = -1.602 \times 10^{-19}$ C es la carga de cada electrón. Convenientemente, existe una relación entre movilidad y N_D, como se muestra en la figura 2.39. Suponga una oblea (disco) de silicio de 8 pulgadas de diámetro y que tiene un espesor de 300 μm. Diseñe una resistencia de 10 Ω mediante la especificación de una concentración de fósforo dentro del rango de $2 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3} \le N_D \le 2 \times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$, junto con una geometría adecuada (la oblea se puede cortar, pero no adelgazar).



■ **FIGURA 2.39**

51. La figura 2.39 representa la relación entre movilidad de electrones μ_n y densidad del impurificante N_D para silicio tipo *n*. Con el conocimiento de que la resistividad en este material está dada por $\rho = [q\mu_n N_D]^{-1}$, grafique la resistividad como función de la densidad del impurificante dentro del rango $10^{14}\ \text{cm}^{-3} \leq N_D \leq 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$.

52. Haciendo referencia a los datos de la tabla 2.4, diseñe una resistencia cuyo valor se pueda variar mecánicamente dentro del rango de 100 a 500 Ω (suponga la operación a 20 °C).

53. Una brecha de 250 pies de longitud separa a una fuente de potencia cd de una bombilla que toma 25 A de corriente. Si se utiliza un alambre de calibre 14 AWG (observe que se necesitan dos alambres, para un total de 500 pies), calcule la cantidad de potencia desperdiciada en el alambre.

54. Los valores de resistencia de la tabla 2.4 están calibrados para operación a 20 °C. Para operar a otras temperaturas, se pueden corregir usando la relación[4]

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{234.5 + T_2}{234.5 + T_1}$$

donde T_1 = temperatura de referencia (20 °C en el caso actual)
T_2 = temperatura de operación deseada
R_1 = resistencia a T_1
R_2 = resistencia a T_2

Un equipo depende para su operación de un alambre externo hecho de cobre blando de calibre 28 AWG, que tiene una resistencia de 50.0 Ω a 20 °C. Desafortunadamente, el ambiente operativo ha cambiado, y ahora está a 110.5 °F. (*a*) Calcule la longitud del alambre original. (*b*) Determine en cuánto debe acortarse el alambre para que vuelva a tener 50.0 Ω .



55. Su medidor favorito contiene una resistencia de precisión (tolerancia de 1%) de 10 Ω. Lamentablemente, la última persona que pidió prestado este medidor quemó, de alguna manera, la resistencia y necesita reemplazarse. Diseñe un reemplazo adecuado, suponiendo que usted puede disponer fácilmente de 1 000 pies de cada uno de los calibres de alambre mencionados en la tabla 2.4.

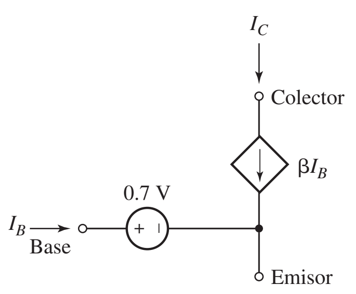
56. En una nueva instalación, usted especificó que todo el alambrado debe cumplir con la especificación ASTM B33 (vea la tabla 2.3). Por desgracia, el subcontratista leyó mal sus instrucciones e instaló en su lugar alambrado B415 (pero del mismo calibre). Suponiendo que la tensión de operación no ha cambiado, (*a*) ¿en cuánto se reducirá la corriente, y (*b*) ¿cuánta potencia adicional se desperdiciará en las líneas? (*Exprese ambas respuestas en términos de porcentaje*).

57. Si se fuerza una corriente de 1 mA a través de un trozo de alambre macizo, redondo, de acero revestido de aluminio (B415) de 2.3 m de longitud y diámetro de 1 mm, ¿cuánta potencia se desperdicia como resultado de las pérdidas resistivas? Si en vez de esto se usa alambre con las mismas dimensiones pero que cumpla las especificaciones B75, ¿en cuánto se reducirá la potencia desperdiciada debido a pérdidas resistivas?

58. La red que se muestra en la figura 2.40 se puede usar para modelar con exactitud el comportamiento de un transistor de unión bipolar siempre y cuando esté operando en la región activa. El parámetro β se conoce como la ganancia de corriente. Si para este dispositivo $\beta = 100$ y se determina I_B como 100 μA, calcule (*a*) I_C, la corriente que fluye hacia la terminal del colector, y (*b*) la potencia disipada por la región base-emisor.

59. Una bombilla de luz de filamento de tungsteno de 100 W funciona aprovechando las pérdidas resistivas en el filamento, absorbiendo 100 J de energía cada segundo del tomacorriente de la pared. ¿Cuánta energía *óptica* por segundo espera usted que produzca esta bombilla? ¿Esto viola el principio de conservación de la energía?

[4] D.G. Fink y H.W. Beaty, *Standard Handbook for Electrical Engineers*, 13a. edición, Nueva York: McGraw-Hill, 1993, pp. 2-9.



■ **FIGURA 2.40** Modelo cd para un transistor de unión bipolar operando en región activa.

60. Las baterías se presentan en una amplia variedad de tipos y tamaños. Dos de las más comunes se llaman "AA" y "AAA". Una sola batería de cualquiera de estos tipos produce nominalmente una tensión entre sus terminales de 1.5 V cuando está plenamente cargada. Entonces, ¿cuáles son las diferencias entre las dos, además del tamaño? (*Pista:* Piense en energía.)

- La ley de corrientes de Kirchhoff (LCK) establece que la suma algebraica de las corrientes que entran a cualquier nodo es nula. (Ejemplos 3.1, 3.4)
- La ley de voltajes (tensiones) de Kirchhoff (LVK) enuncia que la suma algebraica de las tensiones alrededor de cualquier trayectoria cerrada en un circuito es nula. (Ejemplos 3.2, 3.3)
- Se dice que todos los elementos de un circuito que conducen la misma corriente están conectados en serie. (Ejemplos 3.5)
- Se dice que los elementos de un circuito que tienen una tensión común entre sus terminales están conectados en paralelo. (Ejemplos 3.6, 3.7)
- Se pueden sustituir fuentes de tensión en serie por una sola fuente, siempre que se tenga cuidado de notar la polaridad individual de cada fuente. (Ejemplos 3.8, 3.10)
- Es posible sustituir las fuentes de corriente en paralelo por una sola fuente, pero hay que tener cuidado de la dirección de cada flecha de corriente. (Ejemplos 3.9, 3.10)
- Una combinación en serie de N resistencias se sustituye por una sola que tiene un valor $R_{eq} = R_1 + R_2 + \cdots + R_N$. (Ejemplo 3.11)
- Una combinación en paralelo de N resistencias se sustituye por una sola resistencia que tiene el valor

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_N}$$

  (Ejemplo 3.12)
- La división de tensión permite calcular la fracción de la tensión total en los extremos de una cadena de resistencias en serie que se reduce entre los extremos de cualquier resistencia (o grupo de resistencias). (Ejemplo 3.13)
- La división de corriente permite calcular la fracción de la corriente total en una cadena en paralelo de resistencias que fluye a través de cualquiera de ellas. (Ejemplo 3.14)

LECTURAS ADICIONALES

Se puede encontrar un análisis de los principios de conservación de la energía y conservación de la carga, así como las leyes de Kirchhoff en

R. Feynman, R. B. Leighton y M. L. Sands, *The Feynman Lectures on Physics.* Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1989, pp. 4-1, 4-7 y 25-9.

Se pueden encontrar explicaciones detalladas sobre numerosos aspectos de las prácticas de conexión a tierra congruentes con el National Electrical Code® de 2008 en

J. E. McPartland, B. J. McPartland y F. P. Hartwell, *McGraw-Hill's National Electrical Code® 2008 Handbook*, 26a. edición, Nueva York, McGraw-Hill, 2008.

EJERCICIOS

3.1 Nodos, trayectorias, lazos y ramas

1. En el circuito de la figura 3.44, cuente el número de (*a*) nodos; (*b*) elementos; (*c*) ramas.

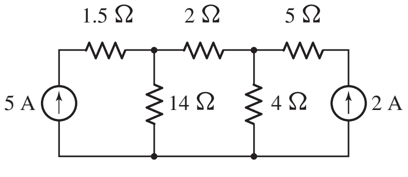
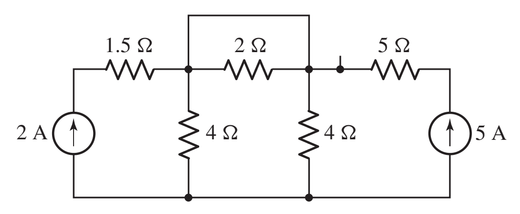
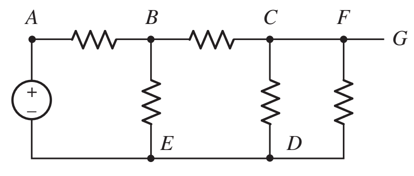


FIGURA 3.44

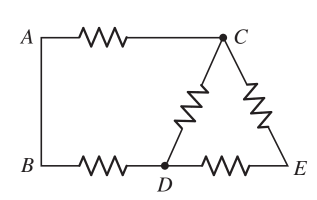
2. En el circuito que se muestra en la figura 3.45, cuente el número de (*a*) nodos; (*b*) elementos; (*c*) ramas.



■ **FIGURA 3.45**



■ **FIGURA 3.46**



■ **FIGURA 3.47**

3. Para el circuito de la figura 3.46:
   (*a*) Cuente el número de nodos.
   (*b*) Al moverse de *A* a *B*, ¿hemos formado una ruta? ¿Hemos formado un bucle?
   (*c*) Al moverse de *C* a *F* a *G*, ¿hemos formado una ruta? ¿Hemos formado un bucle?
4. Para el circuito de la figura 3.46:
   (*a*) Cuente el número de elementos del circuito.
   (*b*) Al moverse de *B* a *C* a *D*, ¿hemos formado una ruta? ¿Hemos formado un bucle?
   (*c*) Al moverse de *E* a *D* a *C* a *B*, ¿hemos formado una ruta? ¿Hemos formado un lazo?
5. Observe el circuito de la figura 3.47 y responda a lo siguiente:
   (*a*) ¿Cuántos nodos distintos contiene el circuito?
   (*b*) ¿Cuántos elementos contiene el circuito?
   (*c*) ¿Cuántas ramas tiene el circuito?
   (*d*) Determine si cada uno de los siguientes movimientos representa una ruta, un bucle, ambos o ninguno:
      (*i*) *A* a *B*
      (*ii*) *B* a *D* a *C* a *E*
      (*iii*) *C* a *E* a *D* a *B* a *A* a *C*
      (*iv*) *C* a *D* a *B* a *A* a *C* a *E*

3.2 Ley de corrientes de Kirchhoff

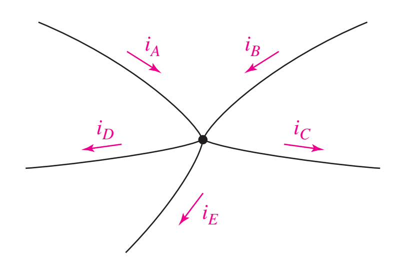
6. Un restaurante local cuenta con un anuncio de neón construido con 12 focos separados; cuando uno de éstos falla, parece como una resistencia infinita y no puede conducir corriente. Para cablear el anuncio, el fabricante presenta dos opciones (figura 3.48). A partir de lo que se aprendió sobre la LCK, ¿cuál deberá seleccionar el propietario? Explicar su respuesta.





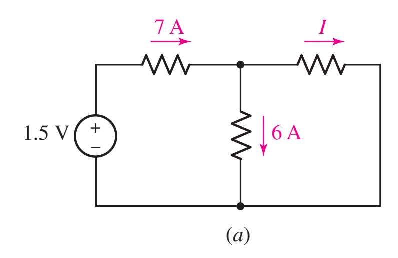
■ **FIGURA 3.48**

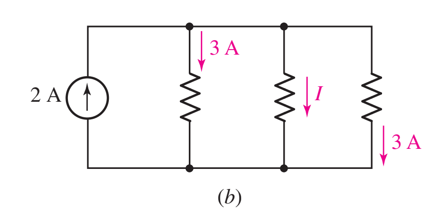
7. Observando el diagrama de un solo nodo de la figura 3.49, calcule:
   (*a*) i_B, si $i_A = 1$ A, $i_D = -2$ A, $i_C = 3$ A, e $i_E = 0$;
   (*b*) i_E, si $i_A = -1$ A, $i_B = -1$ A, $i_C = -1$ A, e $i_D = -1$ A.

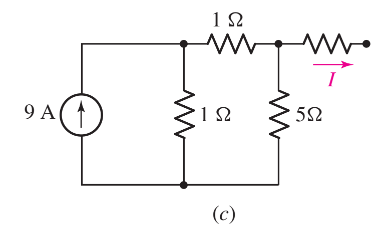


■ **FIGURA 3.49**

8. Determine la corriente etiquetada I en cada uno de los circuitos de la figura 3.50.

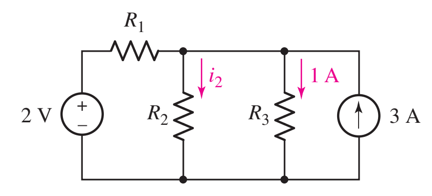






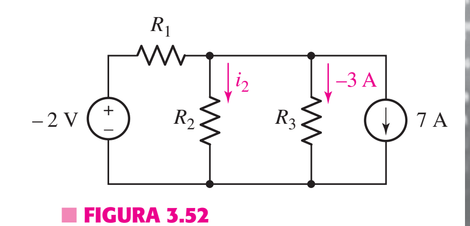
■ **FIGURA 3.50**

9. En el circuito que se muestra en la figura 3.51, los valores de las resitencias son desconocidos, pero se sabe que la fuente de 2 V suministra una corriente de 7 A al resto del circuito. Calcule la corriente etiquetada como i_2.

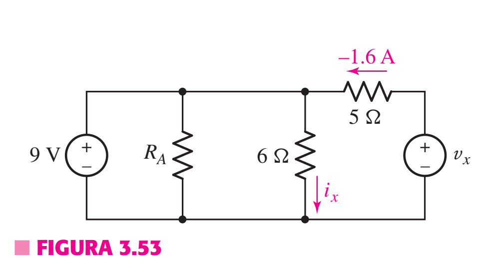


■ **FIGURA 3.51**

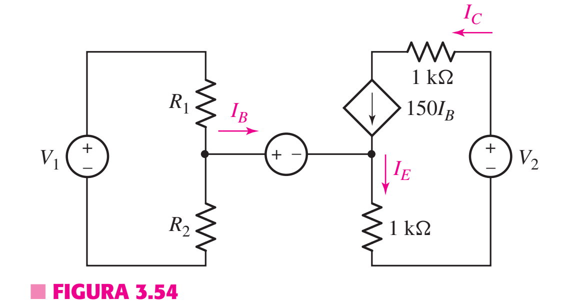
10. La fuente de tensión en el circuito de la figura 3.52 tiene una corriente de 1 A que sale de la terminal positiva hacia la resistencia R_1. Calcule la corriente marcada como i_2.
11. En el circuito representado en la figura 3.53, i_x se determina como 1.5 A, y la fuente de 9 V suministra una corriente de 7.6 A (es decir, una corriente de 7.6 A sale de la terminal positiva de la fuente de 9 V). Determine el valor de la resistencia R_A.
12. Para el circuito de la figura 3.54 (que es un modelo de operación en cd de un transistor de unión bipolar polarizado en la región activa), I_B se mide como 100 μA. Determine I_C e I_E.



■ **FIGURA 3.52**

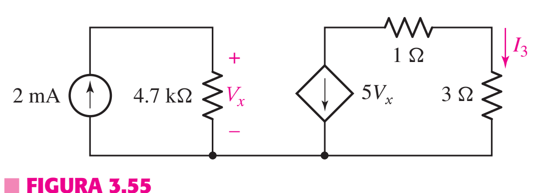


■ **FIGURA 3.53**



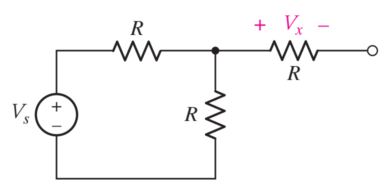
■ **FIGURA 3.54**

13. Determine la corriente marcada como I_3 en la figura 3.55.



■ **FIGURA 3.55**

14. Estudie el circuito representado en la figura 3.56 y explique (en términos de la LCK) por qué la tensión marcada como V_x debe ser cero.

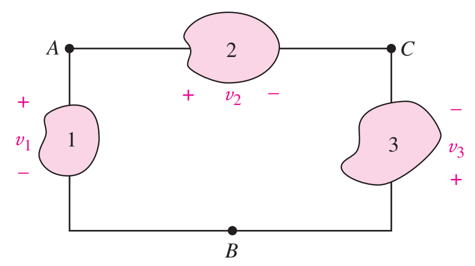


■ **FIGURA 3.56**

15. En muchos hogares, en una habitación determinada a menudo hay múltiples tomas de corriente eléctrica que son parte de un mismo circuito. Dibuje el circuito de una habitación de cuatro paredes que tiene una sola toma de corriente en cada pared, con una bombilla (representada por una resistencia de 1 Ω) conectada a cada toma de corriente.

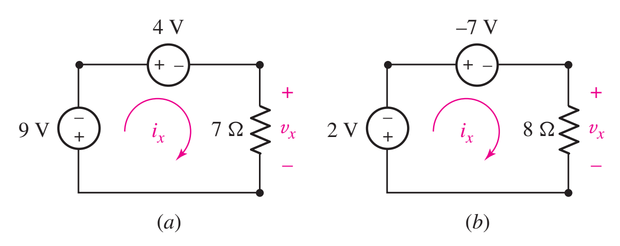
3.3 Ley de tensiones de Kirchhoff

16. Para el circuito de la figura 3.57:
    (*a*) Determine la tensión v_1 si $v_2 = 0$ y $v_3 = -17$ V.
    (*b*) Determine la tensión v_1 si $v_2 = -2$ V y $v_3 = +2$ V.
    (*c*) Determine la tensión v_2 si $v_1 = 7$ V y $v_3 = 9$ V.
    (*d*) Determine la tensión v_3 si $v_1 = -2.33$ V y $v_2 = -1.70$ V.



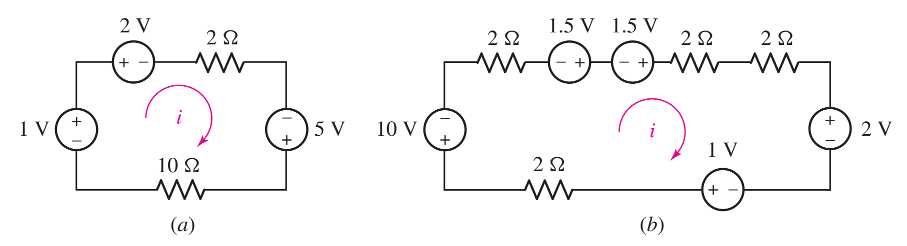
■ **FIGURA 3.57**

17. Para cada uno de los circuitos de la figura 3.58, determine la tensión v_x y la corriente i_x.



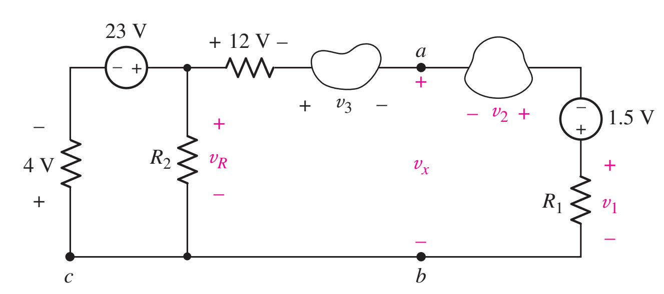
■ **FIGURA 3.58**

18. Use la LVK para obtener un valor numérico para la corriente etiquetada i en cada circuito representado en la figura 3.59.



■ **FIGURA 3.59**

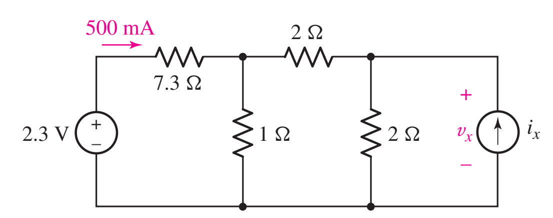
19. En el circuito de la figura 3.60, se determina que $v_1 = 3$ V y $v_3 = 1.5$ V. Calcule v_R y v_2.



■ **FIGURA 3.60**

20. En el circuito de la figura 3.60, se usa un voltímetro para medir lo siguiente: $v_1 = 2$ V y $v_3 = -1.5$ V. Calcule v_x.

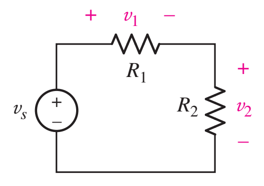
21. Determine el valor de v_x como se etiqueta en el circuito de la figura 3.61.



■ **FIGURA 3.61**

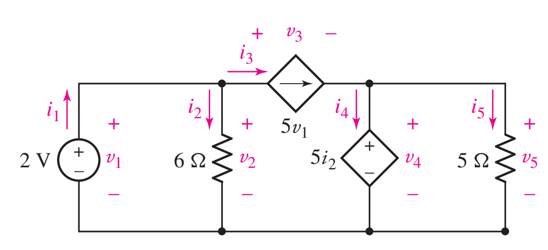
22. Considere el circuito simple que se muestra en la figura 3.62. Con base en la LVK, deduzca las expresiones:

$$v_1 = v_s \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad \text{y} \quad v_2 = v_s \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$



■ **FIGURA 3.62**

23. (*a*) Determine un valor numérico para cada corriente y tensión (i_1, v_1, etc.) en el circuito de la figura 3.63. (*b*) Calcule la potencia absorbida por cada elemento y verifique que la suma de las potencias absorbidas sea cero.



■ **FIGURA 3.63**

24. El circuito que se presenta en la figura 3.64 muestra un dispositivo conocido como amp op. Este dispositivo tiene dos propiedades particulares en el circuito que se muestra: 1) $V_d = 0$ V, y 2) no puede circular ninguna corriente en cualquier terminal de entrada (marcada con un "−" y un "+" dentro del símbolo), pero *sí puede* circular a través de la terminal de salida (marcada "SAL"). Esta situación aparentemente imposible —en conflicto directo con la LCK— es un resultado de canalizaciones de potencia hacia este dispositivo que no están incluidas en el símbolo. Con base en esta información, calcule V_{sal}. (*Pista*: Se requieren dos ecuaciones LVK, que tomen en cuenta la fuente de 5 V.)

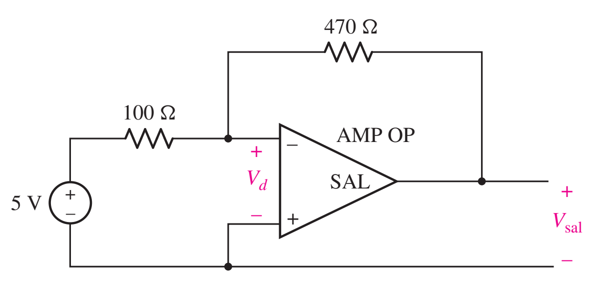


FIGURA 3.64

3.4 El circuito de un solo bucle (lazo)

25. El circuito de la figura 3.12*b* se compone de lo siguiente: $v_{s1} = -8$V, $R_1 = 1\ \Omega$, $v_{s2} = 16$ V y $R_2 = 4.7\ \Omega$. Calcule la potencia absorbida por cada elemento. Verifique que las potencias absorbidas sumen cero.

26. Obtenga un valor numérico para la potencia absorbida por cada elemento del circuito que se muestra en la figura 3.65.

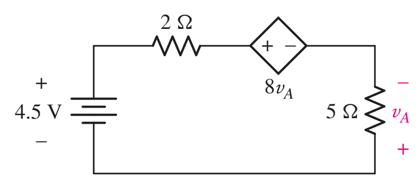


FIGURA 3.65

27. Calcule la potencia absorbida por cada elemento del circuito de la figura 3.66.

28. Calcule la potencia absorbida por cada elemento del circuito de la figura 3.67 si el elemento misterioso *X* es (*a*) una resistencia de 13 Ω; (*b*) una fuente de tensión dependiente etiquetada como $4v_1$, con referencia "+" en la parte superior; (*c*) una fuente de tensión dependiente marcada como $4i_x$, con referencia "+" en la parte superior.

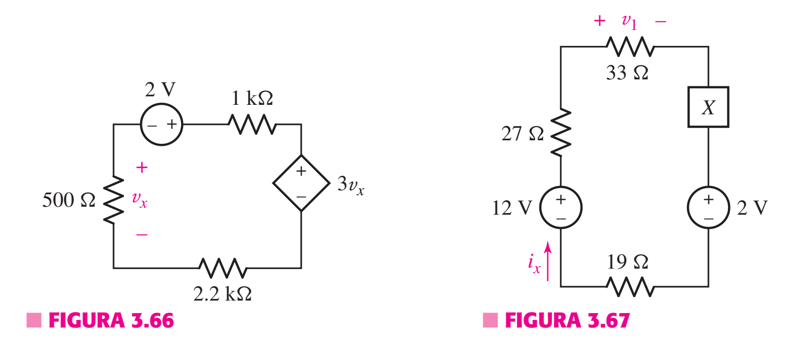


FIGURA 3.66 **FIGURA 3.67**

29. Las leyes de Kirchhoff se aplican, independientemente de que la ley de Ohm se cumpla para un elemento particular. La característica *I*-*V* de un diodo, por ejemplo, está dada por

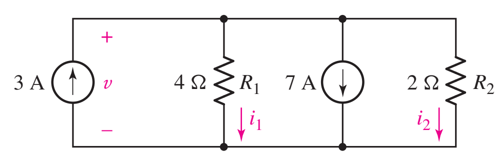
$$I_D = I_S\left(e^{V_D/V_T} - 1\right)$$

donde $V_T = 27$ mV a temperatura ambiente e I_S puede variar desde 10^{-12} hasta 10^{-3} A. En el circuito de la figura 3.68, utilice las LVK y LCK para obtener V_D si $I_S = 29$ pA. (*Nota: este problema da como resultado una ecuación trascendental que requiere un método iterativo para obtener una solución numérica. La mayor parte de las calculadoras científicas pueden efectuar una función de este tipo*.)

■ **FIGURA 3.68**

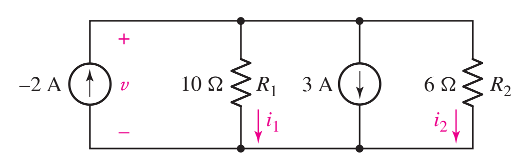
3.5 El circuito de un solo par de nodos

30. Con referencia al circuito de la figura 3.69, (*a*) determine las dos corrientes i_1 e i_2; (*b*) calcule la potencia absorbida por cada elemento.



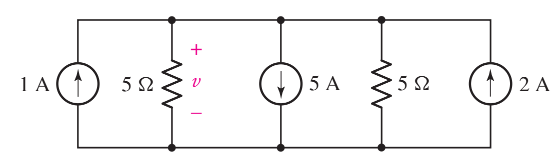
■ **FIGURA 3.69**

31. Determine un valor para la tensión v marcada en el circuito de la figura 3.70 y calcule la potencia suministrada por las dos fuentes de corriente.



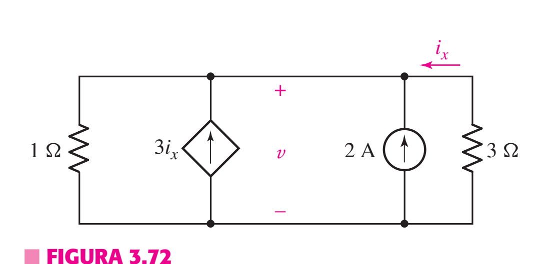
■ **FIGURA 3.70**

32. Con referencia al circuito representado en la figura 3.71, determine el valor de la tensión v.



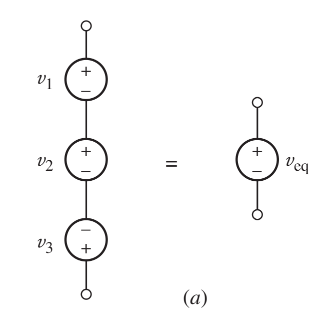
■ **FIGURA 3.71**

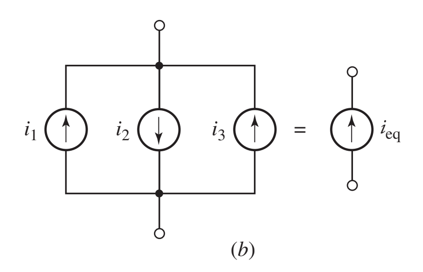
33. Determine la tensión v etiquetada en la figura 3.72 y calcule la potencia suministrada por cada fuente de corriente.
34. Aunque está dibujado de tal manera que puede no parecer obvio a primera vista, el circuito de la figura 3.73 es, de hecho, un circuito de solo un par de nodos. (*a*) Determine la potencia absorbida por cada resistencia. (*b*) Determine la potencia suministrada por cada fuente de corriente. (*c*) Demuestre que la suma de la potencia absorbida calculada en (*a*) es igual a la suma de la potencia suministrada calculada en (*b*).



■ **FIGURA 3.72**

■ **FIGURA 3.73**

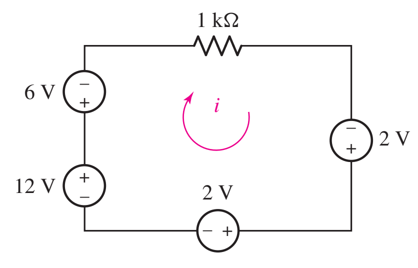




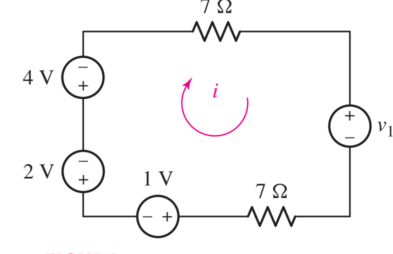
■ **FIGURA 3.74**

3.6 Fuentes conectadas en serie y en paralelo

35. Determine el valor numérico para v_{eq} en la figura 3.74*a*, si (*a*) $v_1 = 0$, $v_2 = -3$ V, y $v_3 = +3$ V; (*b*) $v_1 = v_2 = v_3 = 1$ V; (*c*) $v_1 = -9$ V, $v_2 = 4.5$ V, $v_3 = 1$ V.
36. Determine el valor numérico para i_{eq} en la figura 3.74*b*, si (*a*) $i_1 = 0$, $i_2 = -3$ A, e $i_3 = +3$ A; (*b*) $i_1 = i_2 = i_3 = 1$ A; (*c*) $i_1 = -9$ A, $i_2 = 4.5$ A, $i_3 = 1$A.
37. Para el circuito que se presenta en la figura 3.75, determine la corriente etiquetada i combinando primero las cuatro fuentes en una sola fuente equivalente.
38. Determine el valor de v_1 necesario para obtener un valor cero para la corriente etiquetada i en el circuito de la figura 3.76.

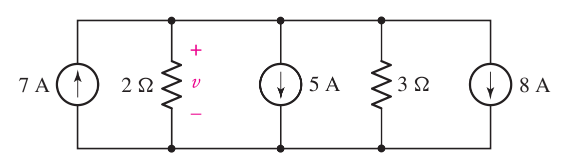


■ **FIGURA 3.75**



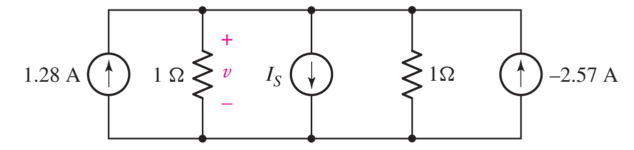
■ **FIGURA 3.76**

39. (*a*) Para el circuito de la figura 3.77, determine el valor de la tensión etiquetada v después de simplificar primero el circuito a una sola fuente de corriente en paralelo con dos resistencias. (*b*) Verifique que la potencia suministrada por su fuente equivalente sea igual a la suma de las potencias suministradas de las fuentes individuales en el circuito original.



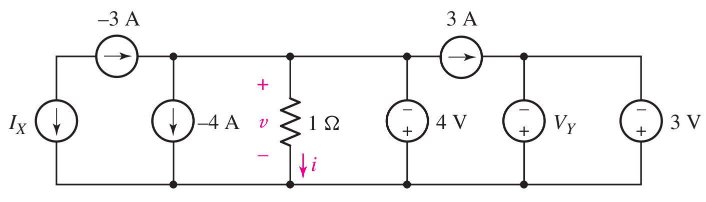
■ **FIGURA 3.77**

40. ¿Qué valor de I_S en el circuito de la figura 3.78 dará como resultado una tensión v igual a cero?



■ **FIGURA 3.78**

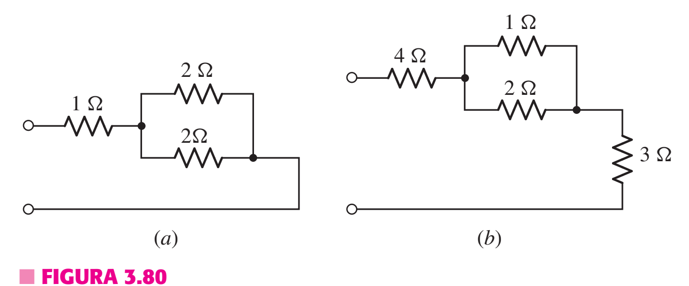
41. (*a*) Determine los valores de I_X y V_Y en el circuito que se muestra en la figura 3.79. (*b*) ¿Son estos valores necesariamente los únicos para ese circuito? Explique. (*c*) Simplifique el circuito de la figura 3.79 tanto como sea posible manteniendo los valores de v e i. (Su circuito debe contener la resistencia de 1 Ω.)



■ **FIGURA 3.79**

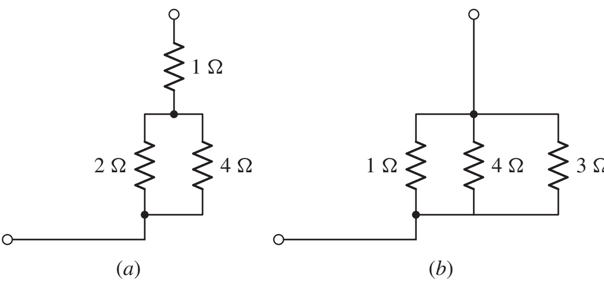
3.7 Resistencias en serie y en paralelo

42. Determine la resistencia equivalente de cada una de las redes que se muestran en la figura 3.80.



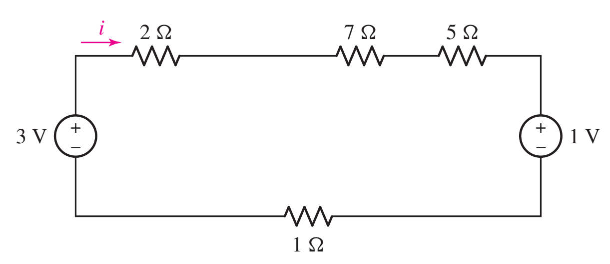
■ **FIGURA 3.80**

43. Para cada red representada en la figura 3.81, determine una sola resistencia equivalente.



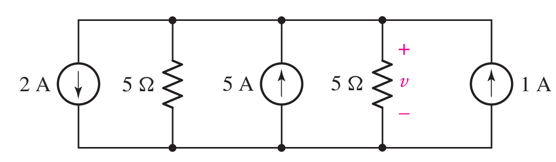
■ **FIGURA 3.81**

44. (*a*) Simplifique el circuito de la figura 3.82 tanto como sea posible usando combinaciones de fuentes y de resistencias. (*b*) Calcule *i*, usando su circuito simplificado. (*c*) ¿A qué tensión se debe cambiar la fuente de 1 V para reducir *i* a cero? (*d*) Calcule la potencia absorbida por la resistencia de 5 Ω.



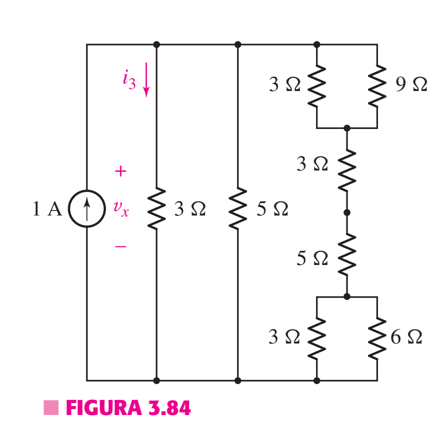
■ **FIGURA 3.82**

45. (*a*) Simplifique el circuito de la figura 3.83 usando combinaciones o reducciones adecuadas de fuentes y resistencias. (*b*) Determine la tensión etiquetada v, usando su circuito simplificado. (*c*) Calcule la potencia suministrada por la fuente de 2 A al resto del circuito.



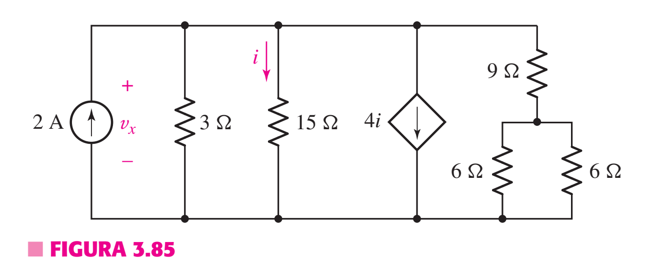
■ **FIGURA 3.83**

46. Haciendo un uso apropiado de las técnicas de combinación de resistencias, calcule i_3 en el circuito de la figura 3.84 y la potencia suministrada al circuito por la fuente de corriente.



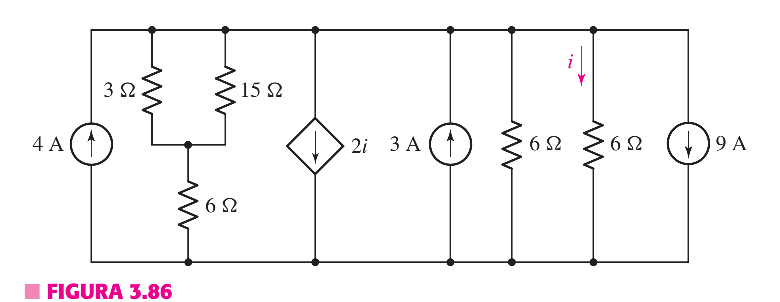
■ **FIGURA 3.84**

47. Calcule la tensión marcada como v_x en el circuito de la figura 3.85 después de simplificar primero, usando combinaciones adecuadas de fuentes y resistencias.



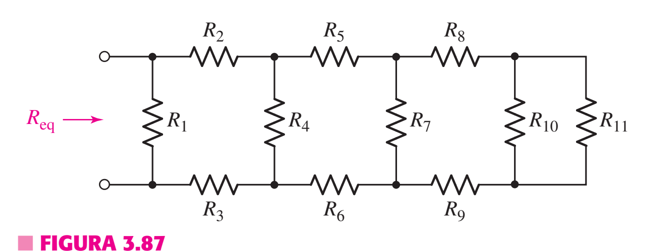
■ **FIGURA 3.85**

48. Determine la potencia absorbida por la resistencia de 15 Ω en el circuito de la figura 3.86.



■ **FIGURA 3.86**

49. Calcule la resistencia equivalente R_{eq} de la red que se muestra en la figura 3.87 si $R_1 = 2R_2 = 3R_3 = 4R_4$, etc., y $R_{11} = 3\ \Omega$.

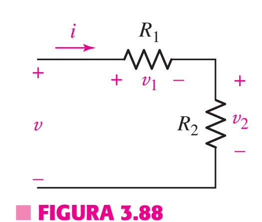


■ **FIGURA 3.87**

50. Muestre cómo combinar cuatro resistencias de 100 Ω para obtener una resistencia combinada de (*a*) 25 Ω; (*b*) 60 Ω; (*c*) 40 Ω.

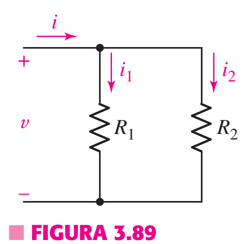
3.8 División de tensión y de corrientes

51. En la red divisora de tensiones de la figura 3.88, calcule (*a*) v_2 si $v = 9.2$ V y $v_1 = 3$ V; (*b*) v_1 si $v_2 = 1$ V y $v = 2$ V; (*c*) v si $v_1 = 3$ V y $v_2 = 6$ V; (*d*) R_1/R_2 si $v_1 = v_2$; (*e*) v_2 si $v = 3.5$ V y $R_1 = 2\ R_2$; (*f*) v_1 si $v = 1.8$ V, $R_1 = 1$ kΩ y $R_2 = 4.7$ kΩ.



■ **FIGURA 3.88**

52. En la red divisora de corrientes representada en la figura 3.89, calcule (*a*) i_1 si $i = 8$ A e $i_2 = 1$ A; (*b*) v si $R_1 = 100$ kΩ, $R_2 = 100$ kΩ, e $i = 1$ mA; (*c*) i_2 si $i = 20$ mA, $R_1 = 1\ \Omega$, y $R_2 = 4\ \Omega$; (*d*) i_1 si $i = 10$ A, $R_1 = R_2 = 9\ \Omega$; (*e*) i_2 si $i = 10$ A, $R_1 = 100$ MΩ y $R_2 = 1\ \Omega$.



■ **FIGURA 3.89**

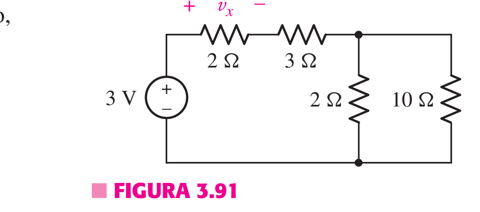
53. Elija una tensión $v < 2.5$ V y valores para las resistencias R_1, R_2, R_3 y R_4 en el circuito de la figura 3.90, de modo que $i_1 = 1$ A, $i_2 = 1.2$ A, $i_3 = 8$ A, e $i_4 = 3.1$ A.

54. Utilice la división de tensión como apoyo para el cálculo de la tensión marcada como v_x en el circuito de la figura 3.91.

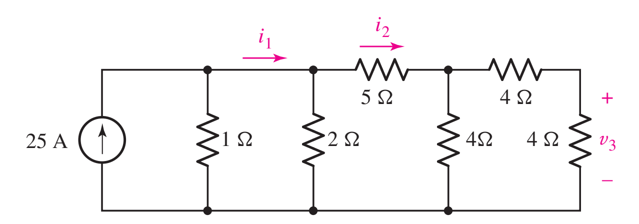
55. Se construye una red de una conexión en serie de cinco resistencias que tienen valores de 1 Ω, 3 Ω, 5 Ω, 7 Ω y 9 Ω. Si se conectan 9 V a las terminales de la red, utilice la división de tensión para calcular la tensión a través de la resistencia de 3 Ω y la tensión a través de la resistencia de 7 Ω.

56. Utilizando la combinación de resistencias y la división de corriente como sea adecuado, determine valores de i_1, i_2 y v_3 en el circuito de la figura 3.92.

■ FIGURA 3.90

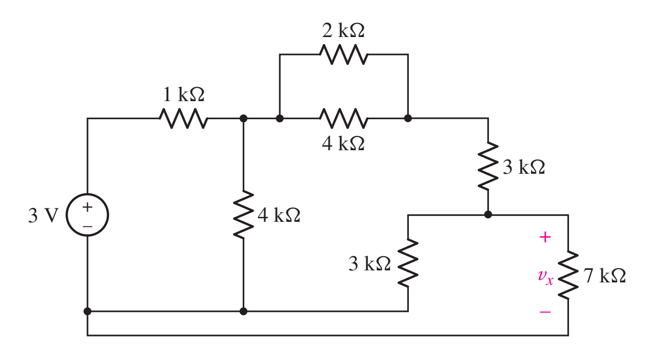


■ FIGURA 3.91



■ FIGURA 3.92

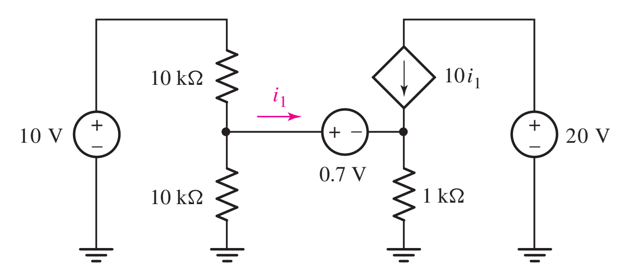
57. En el circuito de la figura 3.93, sólo interesa la tensión v_x. Simplifique el circuito usando la combinación adecuada de resistencias y empleando iterativamente división de tensión para determinar v_x.



■ FIGURA 3.93

Ejercicios de integración de capítulo

58. El circuito que se muestra en la figura 3.94 es un modelo lineal de un transistor de unión bipolar polarizado en la región activa. Explique por qué la división de tensión no es un método válido para determinar la tensión a través de cualquiera de las resistencias de 10 kΩ.



■ FIGURA 3.94

59. En la figura 3.95 se muestra un modelo de un amplificador implementado con transistores de efecto de campo para frecuencia media. Si el parámetro controlador g_m (conocido como *transconductancia*) es igual a 1.2 mS, utilice la división de corriente para obtener la corriente a través de la resistencia de 1 kΩ, y luego calcule la tensión de salida del amplificador v_{salida}.

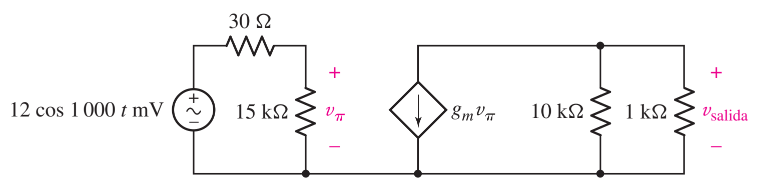


FIGURA 3.95

60. El circuito que se representa en la figura 3.96 se emplea rutinariamente para modelar la operación en frecuencia media de un amplificador implementado con transistores de unión bipolar. Calcule la salida del amplificador v_{salida} si la transconductancia g_m es igual a 322 mS.

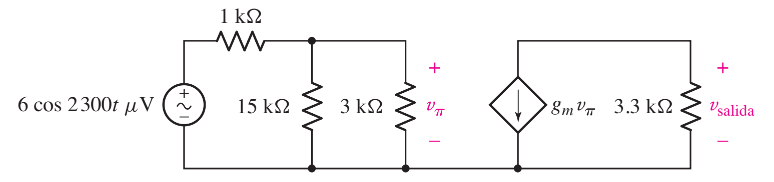


FIGURA 3.96

61. Con respecto al circuito que se muestra en la figura 3.97, calcule (*a*) la tensión a través de las dos resistencias de 10 Ω, suponiendo que la terminal superior es la referencia positiva; (*b*) la potencia disipada por la resistencia de 4 Ω.

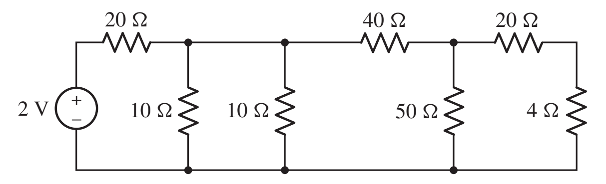


FIGURA 3.97

62. Elimine la resistencia de 10 Ω más a la izquierda en el circuito de la figura 3.97, y calcule (*a*) la corriente que entra a la terminal izquierda de la resistencia de 40 Ω; (*b*) la potencia suministrada por la fuente de 2 V; (*c*) la potencia disipada por la resistencia de 4 Ω.

63. Considere el circuito de siete elementos representado en la figura 3.98. (*a*) ¿Cuántos nodos, bucles y ramas contiene? (*b*) Calcule el flujo de corriente a través de cada resistencia. (*c*) Determine la tensión a través de la fuente de corriente, suponiendo que la terminal superior es la terminal de referencia positiva.

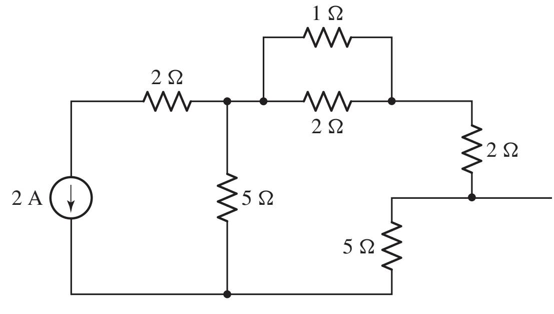


FIGURA 3.98

nodal. (De manera contraria, una fuente dependiente agregará una ecuación extra al análisis de malla si la variable de control es una tensión, pero no lo hará así si la variable de control es una corriente de malla). (Ejemplos 4.3, 4.4, 4.6, 4.9, 4.10, 4.12)

- Cuando se deba decidir si se usa el análisis nodal o el de malla para un circuito plano, pensar que un circuito con menor número de nodos/supernodos dará lugar a menos número de ecuaciones mediante el análisis nodal.
- El análisis asistido por computadora resulta útil para verificar resultados y analizar circuitos con una gran cantidad de elementos. Sin embargo, debe recurrirse al sentido común para verificar los resultados de la simulación.

LECTURAS ADICIONALES

Un tratamiento detallado del análisis nodal y de malla puede encontrarse en:

R. A. DeCarlo y P. M. Lin, *Linear Circuit Analysis,* 2a. edición, Nueva York: Oxford University Press, 2001.

Una sólida guía para utilizar SPICE es:

P. Tuinenga, *SPICE: A Guide to Circuit Simulation and Analysis Using PSPICE,* 3a. edición, Upper Saddle River, N.J.: Prentice-Hall, 1995.

EJERCICIOS

4.1 Análisis de nodo

1. Resuelva los siguientes sistemas de ecuaciones:

   (*a*) $2v_2 - 4v_1 = 9$ y $v_1 - 5v_2 = -4$;

   (*b*) $-v_1 + 2v_3 = 8$; $2v_1 + v_2 - 5v_3 = -7$; $4v_1 + 5v_2 + 8v_3 = 6$.

2. Evalúe los siguientes determinantes:

$$(a)\begin{vmatrix} 2 & 1 \\ -4 & 3 \end{vmatrix} \qquad (b)\begin{vmatrix} 0 & 2 & 11 \\ 6 & 4 & 1 \\ 3 & -1 & 5 \end{vmatrix}.$$

3. Utilice la regla de Cramer para despejar v_2 en cada parte del ejercicio 1.



4. (*a*) Resuelva el siguiente sistema de ecuaciones:

$$3 = \frac{v_1}{5} - \frac{v_2 - v_1}{22} + \frac{v_1 - v_3}{3}$$

$$2 - 1 = \frac{v_2 - v_1}{22} + \frac{v_2 - v_3}{14}$$

$$0 = \frac{v_3}{10} + \frac{v_3 - v_1}{3} + \frac{v_3 - v_2}{14}$$

   (*b*) Verifique su solución usando MATLAB.



5. (*a*) Resuelva el siguiente sistema de ecuaciones:

$$7 = \frac{v_1}{2} - \frac{v_2 - v_1}{12} + \frac{v_1 - v_3}{19}$$

$$15 = \frac{v_2 - v_1}{12} + \frac{v_2 - v_3}{2}$$

$$4 = \frac{v_3}{7} + \frac{v_3 - v_1}{19} + \frac{v_3 - v_2}{2}$$

   (*b*) Verifique su solución usando MATLAB.



6. Corrija el siguiente código de MATLAB (y verifique al ejecutar el código):

```
>> e1 = '3 = v/7 - (v2 - v1)/2 + (v1 - v3)/3;
>> e2 = '2 = (v2 - v1)/2 + (v2 - v3)/14';
>> e  '0 = v3/10 + (v3 - v1)/3 + (v3 - v2)/14';
>>
>> a = sove(e e2 e3, 'v1', v2, 'v3')
```

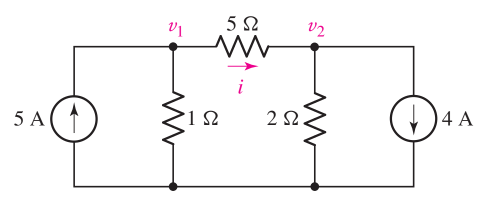
7. Identifique los errores obvios en el siguiente conjunto completo de ecuaciones de nodos si se sabe que la última ecuación es correcta:

$$7 = \frac{v_1}{4} - \frac{v_2 - v}{1} + \frac{v_1 - v_3}{9}$$

$$0 = \frac{v_2 - v_1}{2} + \frac{v_2 - v_3}{2}$$

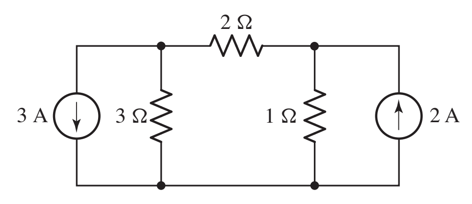
$$4 = \frac{v_3}{7} + \frac{v_3 - v_1}{19} + \frac{v_3 - v_2}{2}$$

8. En el circuito de la figura 4.34, determine la corriente marcada como i con la ayuda de técnicas de análisis de nodos.



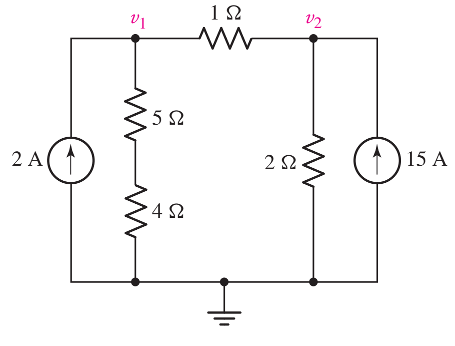
■ FIGURA 4.34

9. Calcule la potencia disipada en la resistencia de 1 Ω de la figura 4.35.



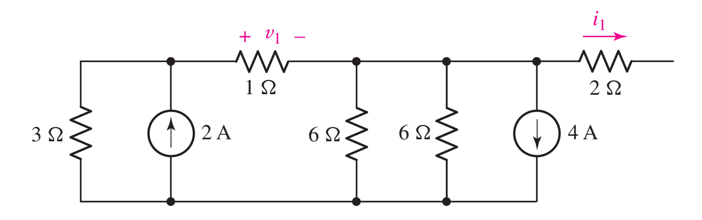
■ FIGURA 4.35

10. Con la ayuda del análisis de nodos, determine $v_1 - v_2$ en el circuito que se muestra en la figura 4.36.



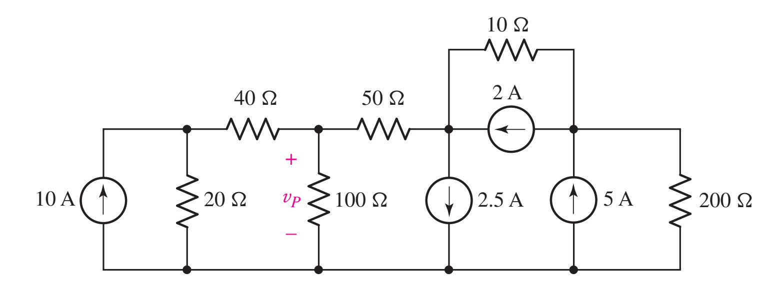
■ FIGURA 4.36

11. En el circuito de la figura 4.37, determine el valor de la tensión marcada como v_1 y la corriente marcada como i_1.



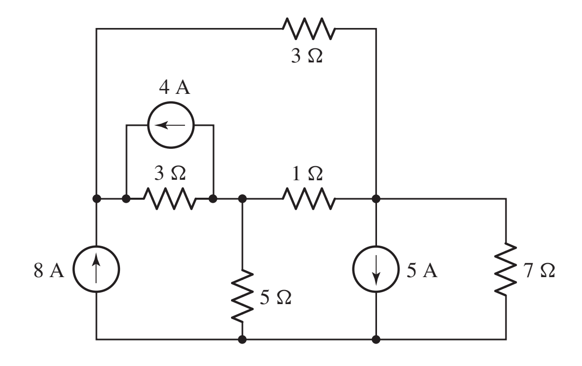
■ **FIGURA 4.37**

12. Recurra al análisis nodal para determinar v_P en el circuito de la figura 4.38.



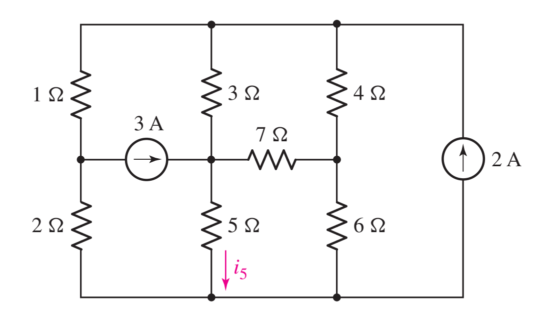
■ **FIGURA 4.38**

13. Usando el nodo inferior como referencia, determine la tensión a través de la resistencia 5 Ω en el circuito de la figura 4.39, y calcule la potencia disipada por la resistencia de 7 Ω.



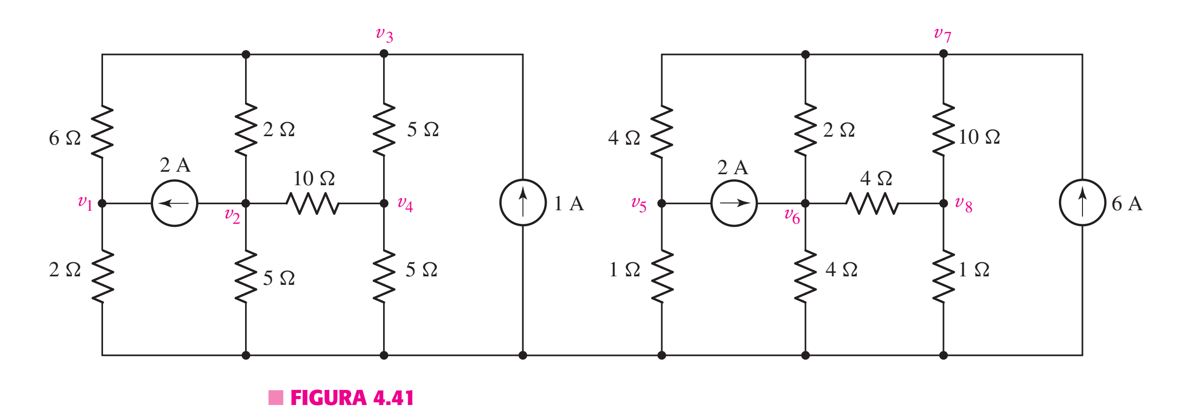
■ **FIGURA 4.39**

14. En el caso del circuito de la figura 4.40 utilice el análisis nodal para determinar la corriente i_5.



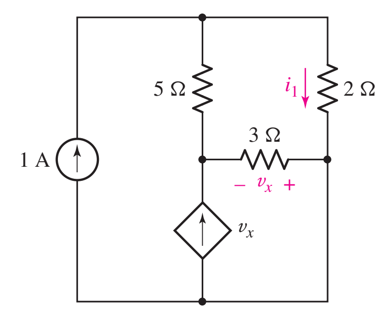
■ **FIGURA 4.40**

15. Determine el valor numérico para cada tensión de nodo en el circuito de la figura 4.41.

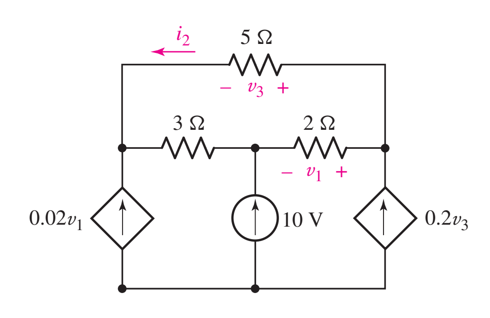


■ **FIGURA 4.41**

16. Determine la corriente i_2 como está identificada en el circuito de la figura 4.42, con la ayuda del análisis de nodos.

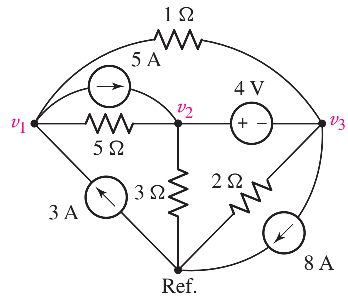


■ **FIGURA 4.43**



■ **FIGURA 4.42**

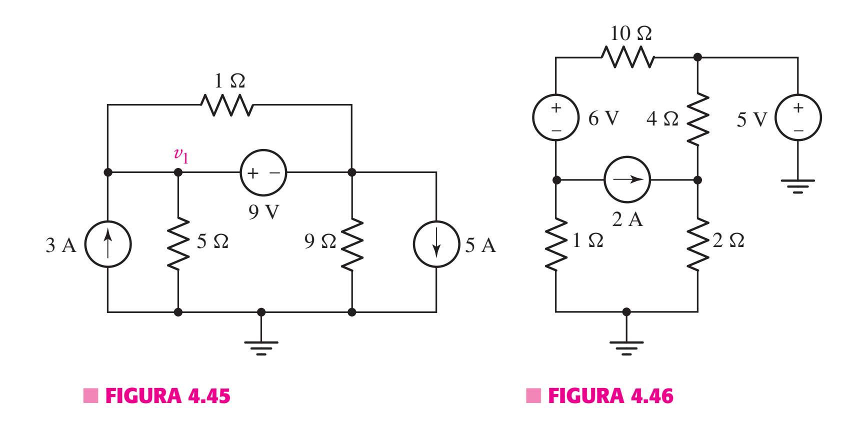
17. Usando el análisis de nodos de forma adecuada, determine la corriente marcada como i_1 en el circuito de la figura 4.43.



■ **FIGURA 4.44**

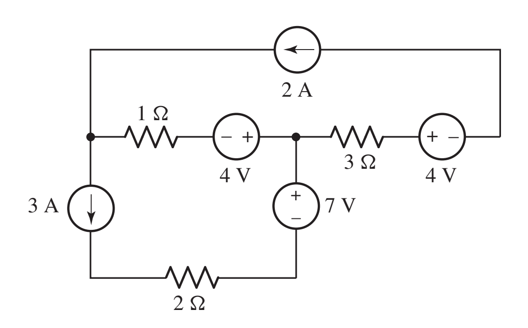
4.2 El supernodo

18. Determine las tensiones de nodo según están identificadas en la figura 4.44, usando la técnica de supernodo de forma adecuada.
19. Para el circuito que se muestra en la figura 4.45, determine el valor numérico para la tensión marcada como v_1.
20. Para el circuito de la figura 4.46, determine tensiones de nodo.



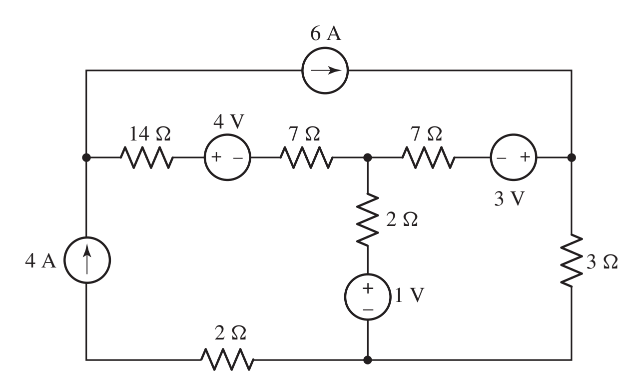
■ **FIGURA 4.45** ■ **FIGURA 4.46**

21. Usando la técnica de análisis de nodos por supernodo de forma adecuada, determine la potencia disipada por la resistencia de 1 Ω en el circuito de la figura 4.47.



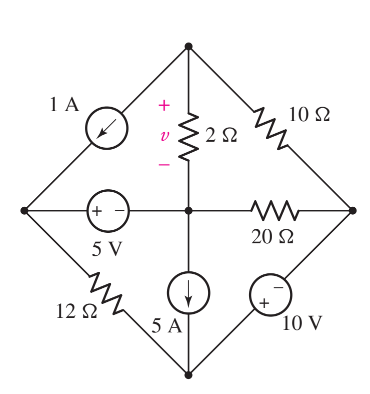
■ **FIGURA 4.47**

22. Con referencia al circuito de la figura 4.48, obtenga un valor numérico para la potencia suministrada por la fuente de 1 V.



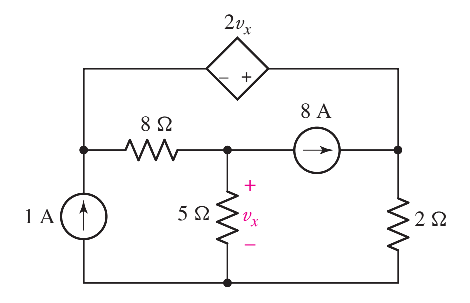
■ **FIGURA 4.48**

23. Determine la tensión marcada como v en el circuito de la figura 4.49.



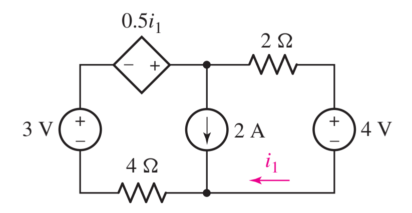
■ **FIGURA 4.49**

24. Determine la tensión v_x en el circuito de la figura 4.50, y la potencia suministrada por la fuente de 1 A.



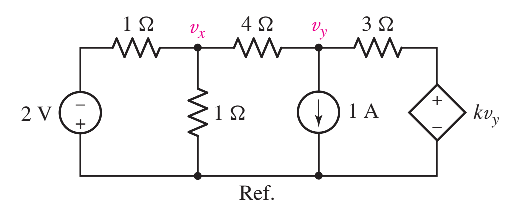
■ **FIGURA 4.50**

25. Considere el circuito de la figura 4.51. Determine la corriente marcada como i_1.



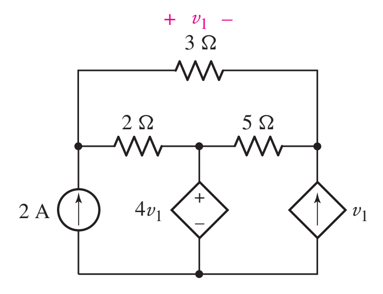
■ **FIGURA 4.51**

26. Determine el valor de k que dará como resultado que v_x sea igual a cero en el circuito de la figura 4.52.



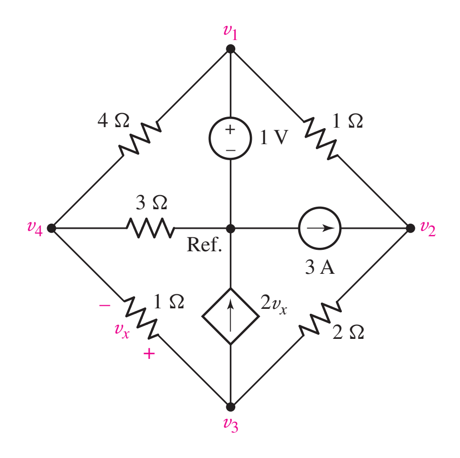
■ **FIGURA 4.52**

27. Para el circuito representado en la figura 4.53, determine la tensión marcada como v_1 a través de la resistencia de 3 Ω.



■ **FIGURA 4.53**

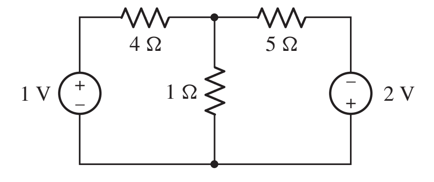
28. Para el circuito de la figura 4.54, determine las cuatro tensiones de nodo.



■ **FIGURA 4.54**

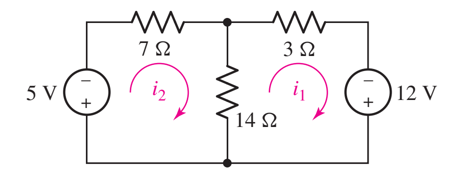
4.3 Análisis de mallas

29. Determine las corrientes que salen de la terminal positiva de cada fuente de tensión en el circuito de la figura 4.55.



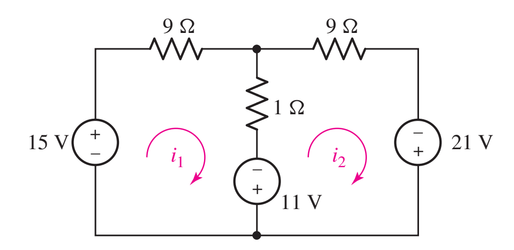
■ **FIGURA 4.55**

30. Obtenga los valores numéricos para las dos corrientes de malla i_1 e i_2 en el circuito que se muestra en la figura 4.56.



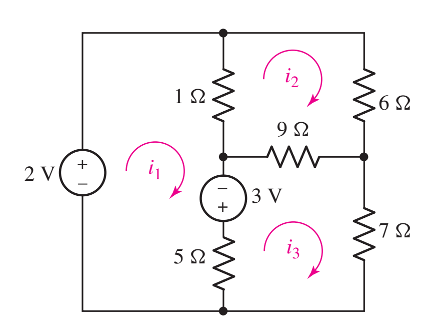
■ **FIGURA 4.56**

31. Use el análisis de mallas de forma adecuada para determinar las dos corrientes de malla marcadas en la figura 4.57.



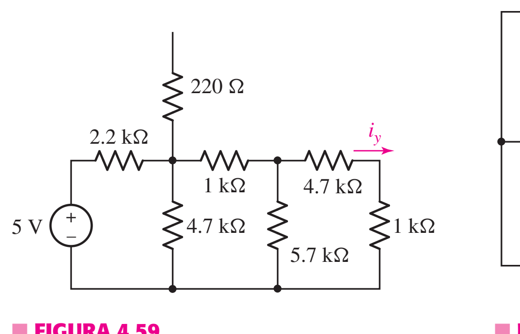
■ **FIGURA 4.57**

32. Determine los valores numéricos para cada una de las tres corrientes de malla marcadas en el diagrama de circuito de la figura 4.58.

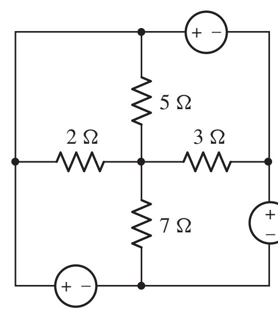


■ **FIGURA 4.58**

33. Calcule la potencia disipada por cada resistencia en el circuito de la figura 4.58.
34. Usando análisis de mallas de forma adecuado, obtenga (*a*) el valor para la corriente i_y y (*b*) la potencia disipada por la resistencia de 220 Ω en el circuito de la figura 4.59.
35. Elija valores diferentes de cero para las tres fuentes de tensión de la figura 4.60, de modo que no fluya corriente a través de ninguna resistencia del circuito.

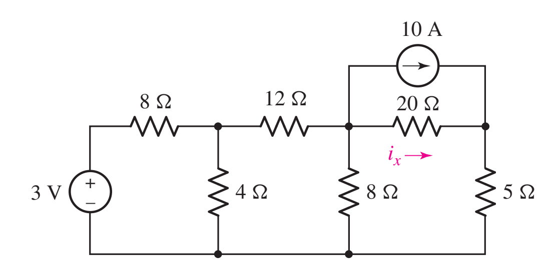


■ **FIGURA 4.59**



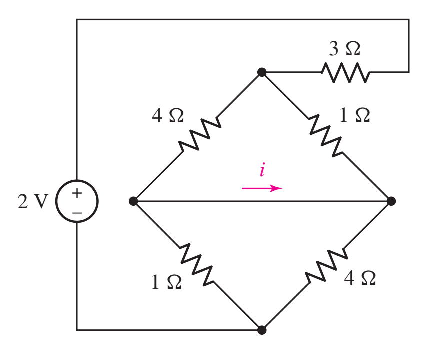
■ **FIGURA 4.60**

36. Calcule la corriente i_x en el circuito de la figura 4.61.



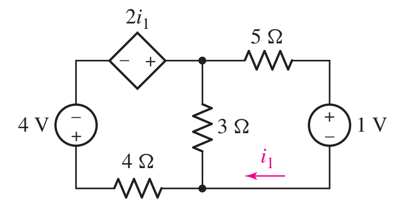
■ **FIGURA 4.61**

37. Usando procedimientos de análisis de mallas, obtenga el valor para la corriente marcada como i en el circuito representado por la figura 4.62.



■ **FIGURA 4.62**

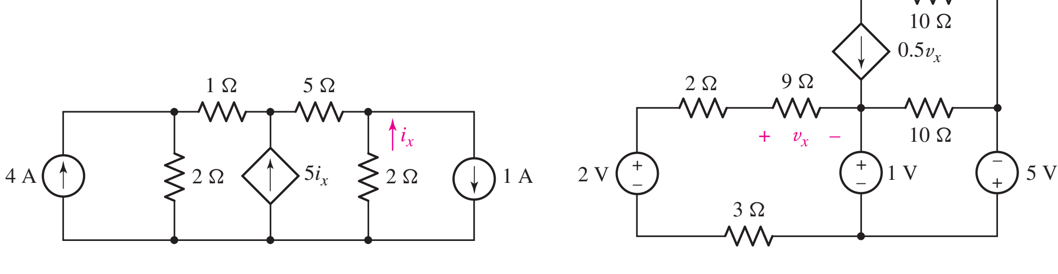
38. Determine la potencia disipada por la resistencia de 4 Ω del circuito que se muestra en la figura 4.63.



■ **FIGURA 4.63**

39. (*a*) Utilice el análisis de mallas para determinar la potencia disipada por la resistencia de 1 Ω en el circuito representado esquemáticamente en la figura 4.64. (*b*) Verifique su respuesta usando análisis de nodos.

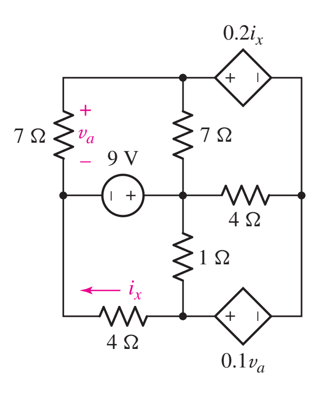
40. Defina tres corrientes de malla en sentido horario para el circuito de la figura 4.65, y utilice el análisis de mallas para obtener el valor de cada una.



■ **FIGURA 4.64**

■ **FIGURA 4.65**

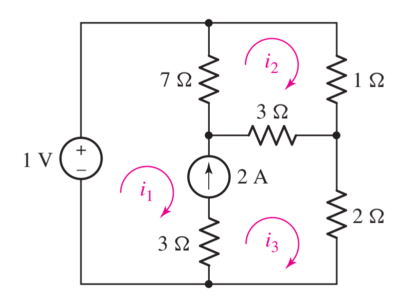
41. Utilice análisis de mallas para obtener los valores de i_x y v_a en el circuito de la figura 4.66.



■ FIGURA 4.66

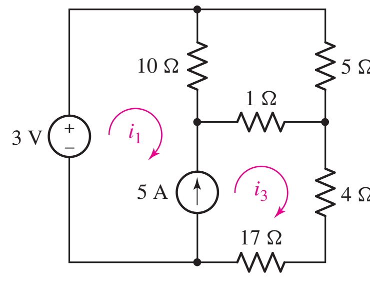
4.4 La supermalla

42. Determine los valores para las tres corrientes de malla de la figura 4.67.



■ FIGURA 4.67

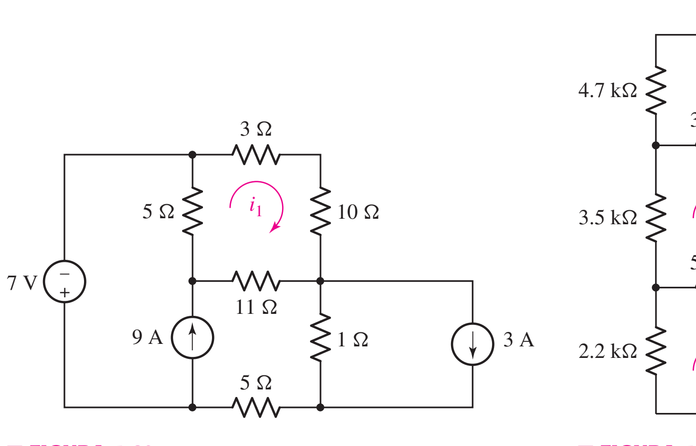
43. Mediante la adecuada aplicación de la técnica de supermalla, obtenga el valor numérico para la corriente de malla i_3 en el circuito de la figura 4.68 y calcule la potencia disipada por la resistencia de 1 Ω.



■ FIGURA 4.68

44. Para el circuito de la figura 4.69, determine la corriente de malla i_1 y la potencia disipada por la resistencia de 1 Ω.

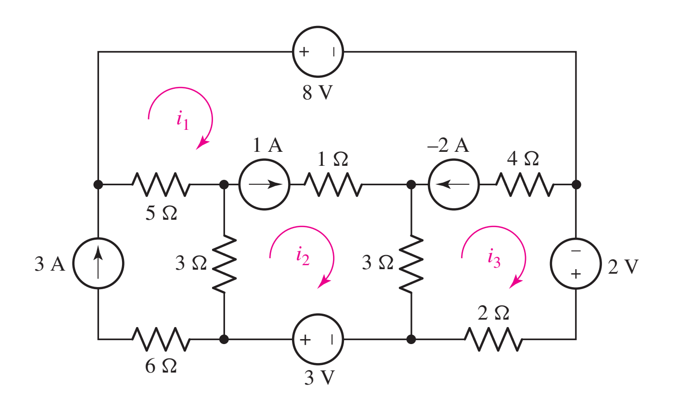
45. Calcule las tres corrientes de malla identificadas en el diagrama de circuito de la figura 4.70.



■ FIGURA 4.69

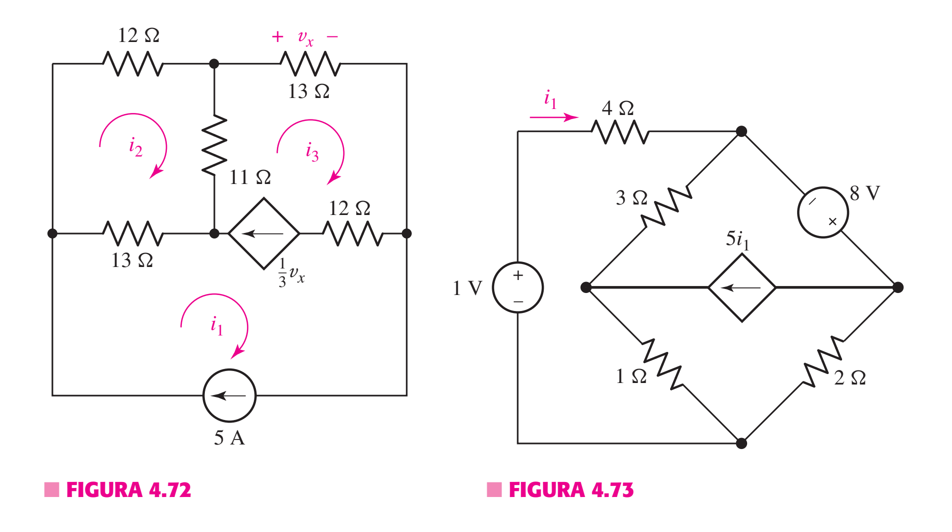
■ FIGURA 4.70

46. Aprovechando al máximo la técnica de supermalla, obtenga valores numéricos para cada una de las corrientes de malla identificadas en el circuito que se muestra en la figura 4.71.



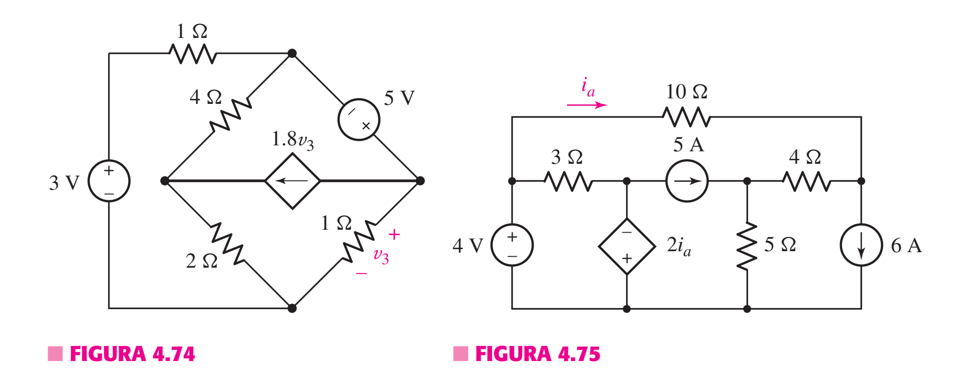
■ **FIGURA 4.71**

47. Mediante la aplicación cuidadosa de la técnica de supermalla, obtenga valores para las tres corrientes de malla marcadas en la figura 4.72.



■ **FIGURA 4.72** ■ **FIGURA 4.73**

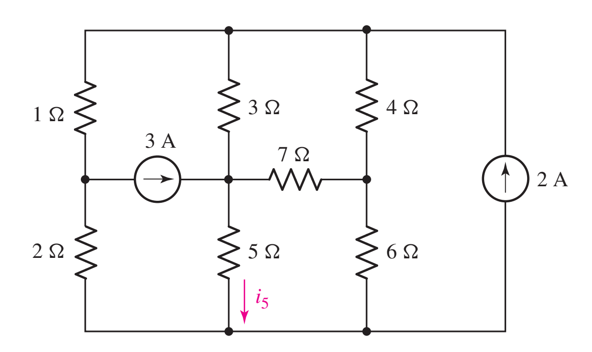
48. Determine la potencia suministrada por la fuente de 1 V en la figura 4.73.
49. Defina tres corrientes de malla en sentido horario para el circuito de la figura 4.74 y utilice la técnica de supermalla para obtener los valores numéricos para cada una.
50. Determine la potencia absorbida por la resistencia de 10 Ω en la figura 4.75.



■ **FIGURA 4.74** ■ **FIGURA 4.75**

4.5 Comparación entre el análisis de nodos y el de malla

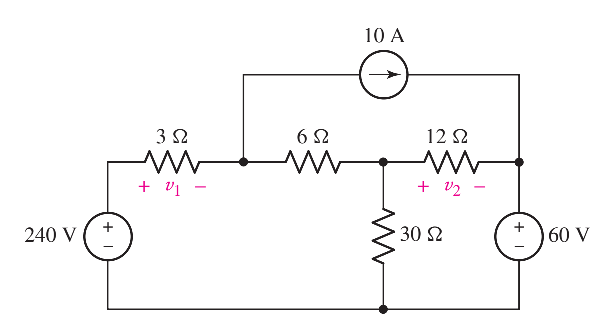
51. Para el circuito representado esquemáticamente en la figura 4.76: (*a*) ¿Cuántas ecuaciones de nodos se necesitarían para determinar i_5? (*b*) Alternativamente, ¿cuántas ecuaciones de malla se necesitarían? (*c*) ¿Cambiaría su método de análisis preferido si sólo se necesitara la tensión a través de la resistencia de 7 Ω? *Explique.*



■ **FIGURA 4.76**

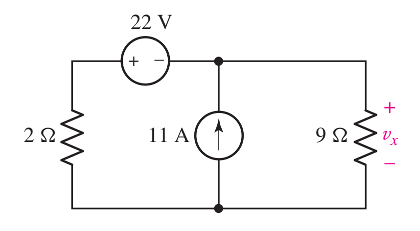
52. El circuito de la figura 4.76 se modifica de tal manera que la fuente de 3 A se reemplaza por una fuente de 3 V cuya terminal de referencia positiva está conectada a la resistencia de 7 Ω. (*a*) Determine el número de ecuaciones de nodos necesarias para determinar i_5. (*b*) Alternativamente, ¿cuántas ecuaciones de malla se necesitarían? (*c*) ¿Cambiaría su método de análisis preferido si sólo se necesitara la tensión a través de la resistencia de 7 Ω? *Explique*.

53. El circuito de la figura 4.77 contiene tres fuentes. (*a*) Como está actualmente dibujado, ¿qué análisis de nodos o de mallas daría como resultado un número menor de ecuaciones para determinar las tensiones v_1 y v_2? *Explique*. (*b*) Si la fuente de tensión se reemplazará por una fuente de corriente, y la fuente de corriente se reemplazara por una fuente de tensión, ¿cambiaría su respuesta al inciso (*a*)? *Explique*.



■ **FIGURA 4.77**

54. Determine la tensión v_x como está marcada en el circuito de la figura 4.78 usando: (*a*) análisis de malla. (*b*) Repita, usando el análisis de nodos. (*c*) ¿Cuál método fue más fácil y por qué?



■ **FIGURA 4.78**

55. Considere el circuito de cinco fuentes de la figura 4.79. Determine el número total de ecuaciones simultáneas que se deben resolver para determinar v_1 usando (*a*) análisis de nodos; (*b*) análisis de mallas. (*c*) ¿Cuál método se prefiere y diga si depende de qué lado de la resistencia de 40 Ω se elija como nodo de referencia? *Explique su respuesta*.

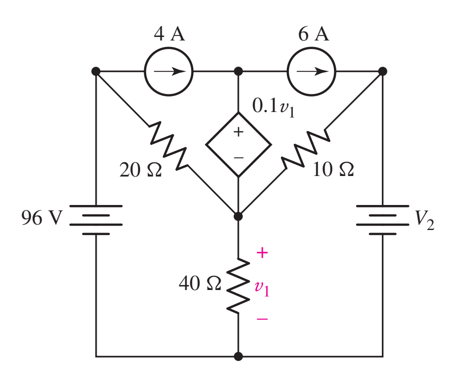


FIGURA 4.79

56. Reemplace la fuente dependiente de tensión en el circuito de la figura 4.79 por una fuente dependiente de corriente orientada de tal manera que la flecha señale hacia arriba. La expresión de control 0.1 v_1 sigue sin cambio. El valor V_2 es cero. (*a*) Determine el número total de ecuaciones simultáneas necesarias para obtener la potencia disipada por la resistencia de 40 Ω si se usa análisis de nodos. (*b*) ¿Se prefiere en su lugar el análisis de mallas? *Explique.*

57. Después de estudiar el circuito de la figura 4.80, determine el número total de ecuaciones simultáneas que se deben resolver para determinar las tensiones v_1 y v_3 usando (*a*) análisis de nodos, (*b*) análisis de mallas.

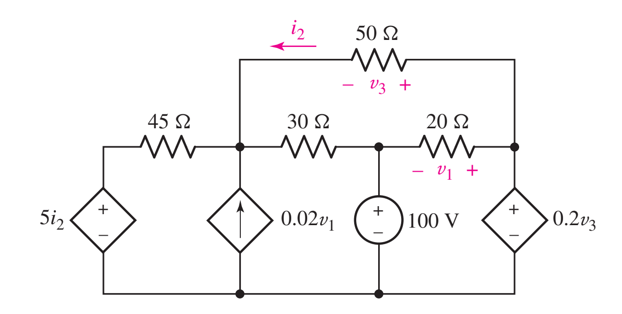


FIGURA 4.80



58. Desde la perspectiva de determinar las tensiones y corrientes correspondientes a todos los componentes, (*a*) diseñe un circuito de cinco nodos y cuatro mallas que se analice más fácilmente usando técnicas de nodos. (*b*) Modifique su circuito reemplazando sólo un componente de tal manera que ahora se analice más fácilmente usando técnicas de mallas.

4.6 Análisis de circuitos asistido por computadora


59. Utilice PSpice (o una herramienta CAD similar) para verificar la solución del ejercicio 8. Imprima el diagrama esquemático correctamente etiquetado con la respuesta destacada, junto con sus cálculos manuales.

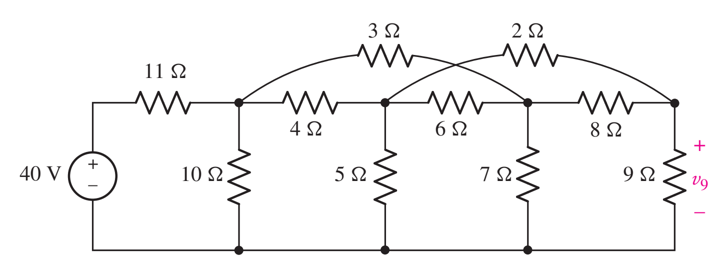

60. Utilice PSpice (o una herramienta CAD similar) para verificar la solución del ejercicio 10. Imprima el diagrama correctamente marcado con las dos tensiones de nodos destacadas, junto con sus cálculos manuales resolviendo las mismas cantidades.


61. Utilice PSpice (o una herramienta CAD similar) para verificar la tensión a través de la resistencia de 5 Ω en el circuito del ejercicio 13. Imprima el diagrama correctamente marcado con la respuesta destacada, junto con sus cálculos manuales.


62. Verifique los valores numéricos para cada tensión de nodo en el ejercicio 15 usando PSpice o una herramienta CAD similar. Imprima el diagrama correctamente marcado con las tensiones de nodos destacadas, junto con sus cálculos manuales.


63. Verifique los valores numéricos de i_1 y v_x como se indican en el circuito del ejercicio 17, usando PSpice o una herramienta CAD similar. Imprima el diagrama adecuadamente marcado con las respuestas destacadas, junto con los cálculos manuales.


64. (*a*) Genere un paquete de información de entrada para SPICE para determinar la tensión v_9 marcada en la figura 4.81. Imprima el archivo generado con la solución destacada. (*b*) Verifique su respuesta manualmente.



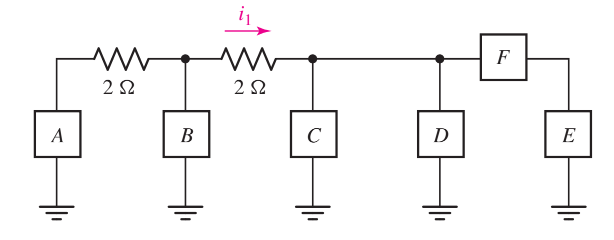
■ **FIGURA 4.81**

Ejercicios de integración de capítulo


65. (*a*) Diseñe un circuito utilizando sólo baterías de 9 V y resistencias de valores estándar con tolerancia de 5% que proporcionen tensiones de 1.5 V, 4.5 V y 5 V y por lo menos una corriente de malla de 1 mA. (*b*) Verifique su diseño usando PSpice o una herramienta CAD similar.


66. Una serie decorativa para exterior de lámparas multicolor se instala en una casa en una tranquila área residencial. Después de conectar el adaptador de 12 V ca en la toma de corriente eléctrica, el dueño observa de inmediato que dos lámparas se han quemado. (*a*) ¿Las lámparas están conectadas en serie o en paralelo? *Explique*. (*b*) Simule la serie de lámparas escribiendo un programa de información de entrada SPICE, suponiendo 44 lámparas, suministro de potencia de 12 V cd, alambre de cobre suave macizo de calibre 24 AWG, y lámparas individuales de 10 mW nominales cada una. Imprima el archivo generado, con la potencia suministrada por la fuente de 12 V destacada. (*c*) Verifique su simulación mediante cálculo manual.

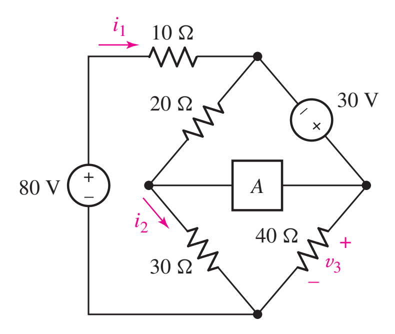

67. Considere el circuito representado en la figura 4.82. Utilice el análisis ya sea de nodo o de malla como herramienta de diseño para obtener un valor de 200 mA para i_1, si los elementos *A, B, C, D, E* y *F* deben ser fuentes ya sea de corriente o de tensión con valores diferentes de cero.



■ **FIGURA 4.82**

68. (*a*) ¿En qué circunstancias la presencia de una fuente independiente de tensión simplifica en gran medida el análisis de nodos? *Explique*. (*b*) ¿En qué circunstancias la presencia de una fuente independiente de corriente simplifica notablemente el análisis de mallas? *Explique*. (*c*) ¿En qué principio físico fundamental se basa el análisis de nodos? (*d*) ¿En qué principio físico fundamental se basa el análisis de mallas?

69. Con referencia a la figura 4.83, (*a*) determine si es más adecuado el análisis de nodos o el de mallas para determinar i_2 si el elemento *A* se reemplaza por un cortocircuito; luego realice el análisis. (*b*) Verifique su respuesta con una simulación PSpice adecuada. Presente el diagrama esquemático adecuadamente marcado, junto con la respuesta destacada.



■ **FIGURA 4.83**

70. El elemento marcado *A* en el circuito de la figura 4.83 se reemplaza por una fuente independiente de tensión de 2.5 V con la terminal de referencia positiva conectada al nodo común de las resistencias de 20 Ω y 30 Ω. (*a*) Determine si es más sencillo el análisis de nodos o el de mallas para determinar la tensión marcada v_3. (*b*) Verifique su respuesta usando PSpice. (*c*) ¿Su conclusión para el inciso (*a*) cambiaría si la corriente i_2 también se preguntara? *Explique*.

- Hay varias formas de obtener la resistencia equivalente de Thévenin, en función de que existan o no fuentes dependientes en la red. (Ejemplos 5.7, 5.8, 5.9, 5.10)
- La transferencia de potencia máxima ocurre cuando la resistencia de carga iguala la resistencia equivalente de Thévenin de la red a la que se conecta. (Ejemplo 5.11)
- Cuando se analiza una red resistiva conectada en Δ, su conversión en Y es un procedimiento directo. Esto puede ser de utilidad para simplificar la red antes de efectuar el análisis. De manera contraria, una red resistiva conectada en Y puede convertirse en una red conectada en Δ como ayuda de la simplificación de la red. (Ejemplo 5.12)

LECTURAS ADICIONALES

Un libro que trata acerca de la tecnología de baterías, y que incluye las características de la resistencia integrada es:

D. Linden, *Handbook of Batteries,* 2a ed. Nueva York: McGraw-Hill, 1995.

Un excelente análisis de casos patológicos y teoremas sobre análisis de circuitos se puede encontrar en:

R. A. DeCarlo y P. M. Lin, *Linear Circuit Analysis,* 2a ed. Nueva York: Oxford University Press, 2001.

EJERCICIOS

5.1 Linealidad y superposición

1. Los sistemas lineales son tan fáciles de trabajar que los ingenieros a menudo construyen modelos lineales de sistemas reales (no lineales) como apoyo para el análisis y el diseño. Tales modelos con frecuencia son sorprendentemente exactos dentro de un rango limitado. Por ejemplo, considere la sencilla función exponencial e^x. La representación mediante la serie de Taylor de esta función es:

$$e^x \approx 1 + x + \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{6} + \cdots$$

   (*a*) Construya un modelo lineal para esta función truncando la expansión de la serie de Taylor después del término lineal. (*b*) Evalúe su función modelo en $x = 0.000001$, 0.0001, 0.01, 0.1 y 1.0. (*c*) ¿Para qué valores de x su modelo es una aproximación “razonable” de e^x? *Explique su razonamiento*.

2. Construya una aproximación lineal a la función $y(t) = 4 \text{ sen } 2t$. (*a*) Evalúe su aproximación en $t = 0$, 0.001, 0.01, 0.1 y 1.0. (*b*) ¿Para qué valores de t su modelo es una aproximación “razonable” a la función real (no lineal) $y(t)$? *Explique su razonamiento*.

3. Considerando el circuito de la figura 5.48, utilice la superposición para determinar los dos componentes de i_8 originadas por la acción de las dos fuentes independientes, respectivamente.

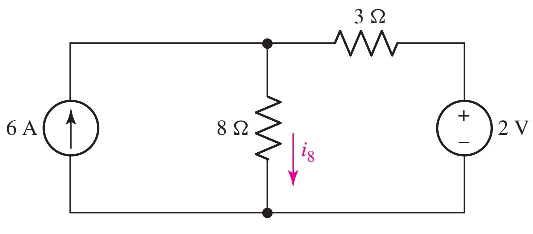
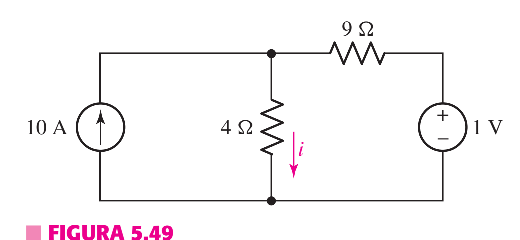


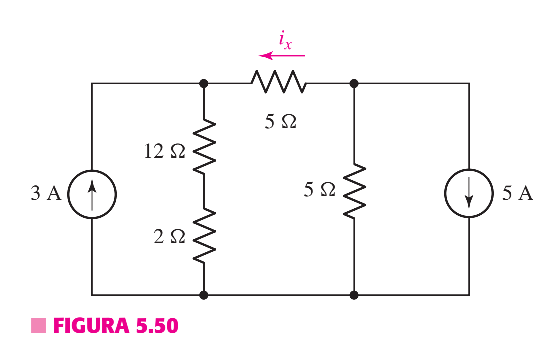
FIGURA 5.48

4. (*a*) Use la superposición para determinar la corriente marcada como *i* en el circuito de la figura 5.49. (*b*) Exprese la contribución que hace la fuente de 1 V a la corriente total *i*, en términos de porcentaje. (*c*) Cambiando sólo el valor de la fuente de 10 A, ajuste el circuito de la figura 5.49 de tal manera que las dos fuentes contribuyan por igual a la corriente *i*.



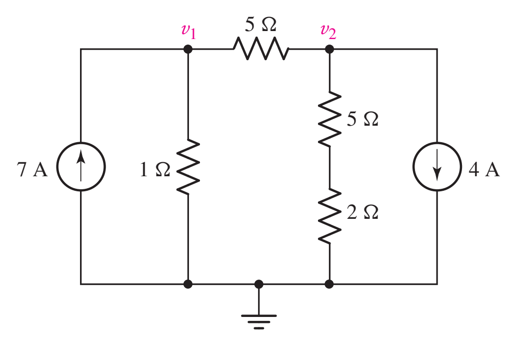
■ **FIGURA 5.49**

5. (*a*) Use la superposición para obtener las contribuciones individuales de cada una de las fuentes en la figura 5.50 a la corriente marcada como i_x. (*b*) Ajustando sólo el valor de la fuente de corriente del extremo derecho, modifique el circuito de tal manera que las dos fuentes contribuyan por igual a i_x.



■ **FIGURA 5.50**

6. (*a*) Determine las contribuciones individuales de cada una de las fuentes de corriente en el circuito de la figura 5.51 a la tensión de nodo v_1. (*b*) Determine la contribución porcentual de cada una de las fuentes para conocer la potencia disipada por la resistencia de 2 Ω.

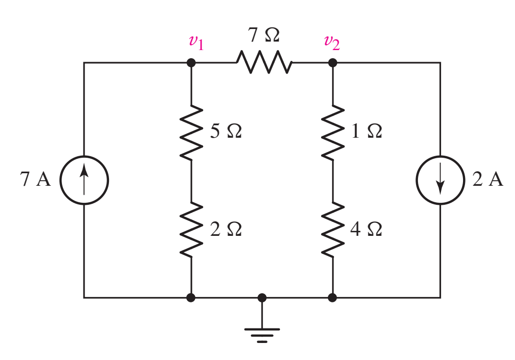


■ **FIGURA 5.51**



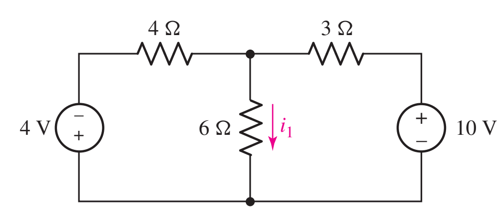
7. (*a*) Determine las contribuciones individuales de cada una de las fuentes de corriente que se muestran en la figura 5.52 de la tensión de nodo marcada como v_2. (*b*) En vez de ejecutar dos simulaciones PSpice separadas, verifique su respuesta usando un solo barrido de

cd. Presente un esquema etiquetado, los resultados pertinentes de Probe y una breve descripción de los resultados.



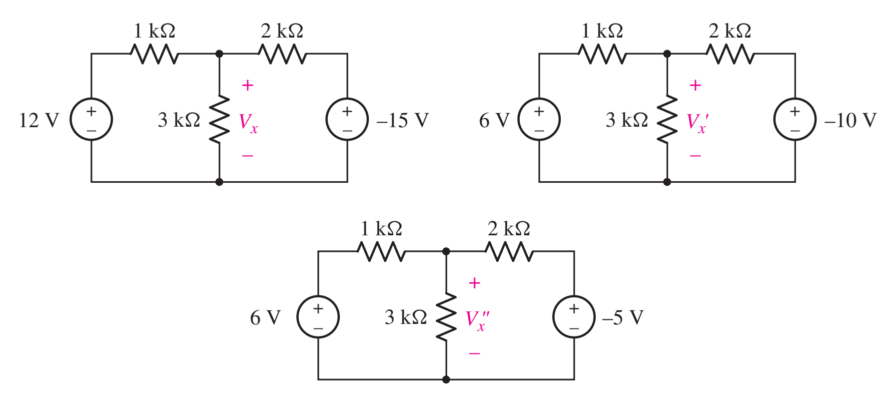
■ **FIGURA 5.52**

8. Después de estudiar el circuito de la figura 5.53, cambie los valores de ambas fuentes de tensión de manera que (*a*) i_1 se duplique; (*b*) el sentido de i_1 se invierta, pero su magnitud no cambie; (*c*) ambas fuentes contribuyan por igual a la potencia disipada por la resistencia de 6 Ω.



■ **FIGURA 5.53**

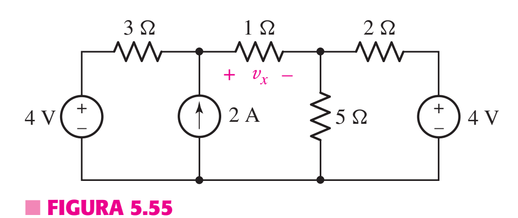
9. Considere los tres circuitos que se muestran en la figura 5.54. Analice cada circuito y demuestre que $Vx = V_x' + V_x''$ (es decir, que *la superposición es más útil cuando las fuentes se ponen en cero, pero el principio es, de hecho, mucho más general que esto*).



■ **FIGURA 5.54**

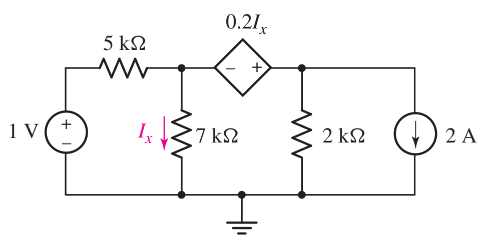


10. (*a*) Usando superposición, determine la tensión marcada como v_x en el circuito representado en la figura 5.55. (*b*) ¿A qué valor se debe cambiar la fuente de 2 A para reducir v_x en 10%? (*c*) Verifique sus respuestas realizando las simulaciones de PSpice adecuadas. Presente un esquema etiquetado, las lecturas pertinentes y una breve descripción de los resultados.



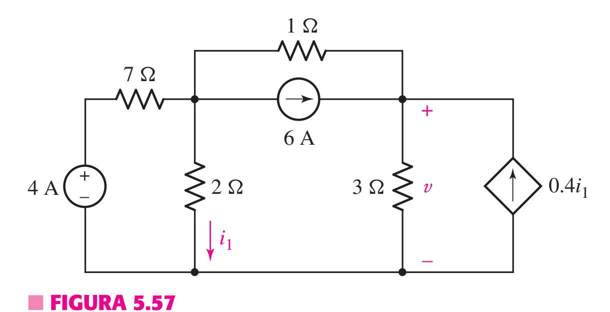
■ **FIGURA 5.55**

11. Use el principio de superposición para obtener el valor para la corriente I_x marcada en la figura 5.56.



■ **FIGURA 5.56**

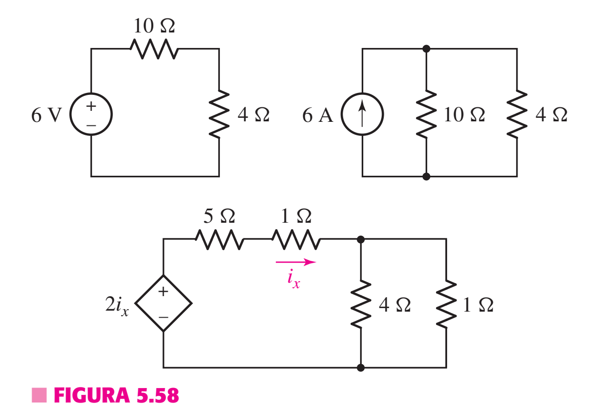
12. (*a*) Use superposición para determinar la contribución individual de cada fuente independiente a la tensión v marcada en el circuito que se muestra en la figura 5.57. (*b*) Calcule la potencia absorbida por la resistencia de 2 Ω.



■ **FIGURA 5.57**

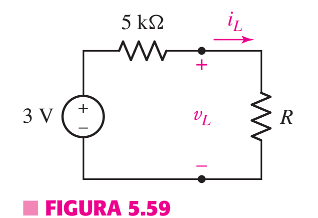
5.2 Transformaciones de fuentes

13. Realice una transformación de fuentes adecuada en cada uno de los circuitos representados en la figura 5.58, teniendo cuidado de conservar la resistencia de 4 Ω en cada circuito modificado.



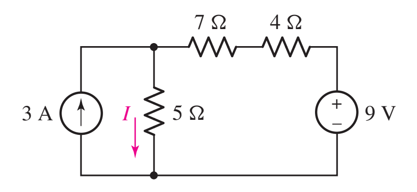
■ **FIGURA 5.58**

14. Para el circuito de la figura 5.59, grafique i_L contra v_L correspondiente al rango $0 \leq R \leq \infty$.



■ **FIGURA 5.59**

15. Determine la corriente marcada como *I* en el circuito de la figura 5.60 realizando primero la transformación de fuentes y las combinaciones paralelo-serie según se necesite para reducir el circuito tanto como sea posible.

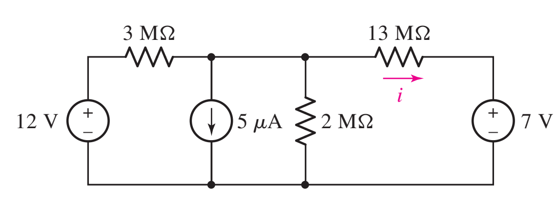


■ **FIGURA 5.60**

16. Verifique que la potencia absorbida por la resistencia de 7 Ω en la figura 5.22*a* siga igual después de la transformación de fuentes ilustrada en la figura 5.22*c*.

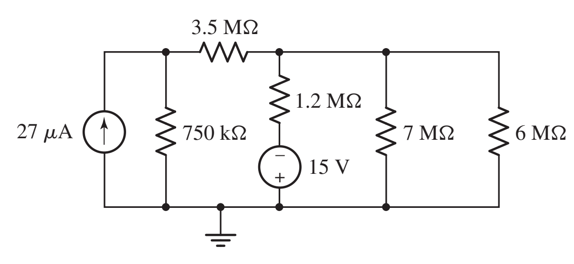


17. (*a*) Determine la corriente marcada como *i* en el circuito de la figura 5.61 después de transformar el circuito de tal manera que contenga solamente resistencias y fuentes de tensión. (*b*) Simule cada circuito para verificar que fluya la misma corriente en ambos casos.



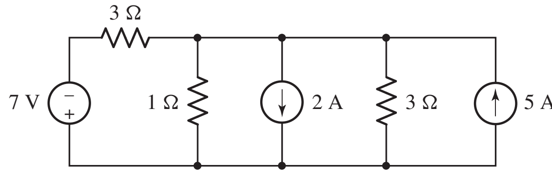
■ **FIGURA 5.61**

18. (*a*) Usando transformaciones sucesivas de fuentes reduzca el circuito de la figura 5.62 a una fuente de tensión en serie con la resistencia, estando ambos elementos en serie con la resistencia de 6 MΩ. (*b*) Calcule la potencia disipada por la resistencia de 6 MΩ usando su circuito simplificado.



■ **FIGURA 5.62**

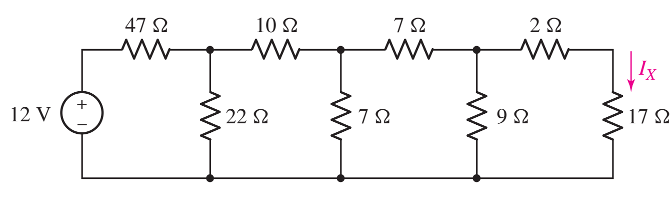
19. (*a*) Usando tantas transformaciones de fuentes y técnicas de combinación de elementos como sean necesarias, simplifique el circuito de la figura 5.63 de modo que contenga solamente la fuente de 7 V, una sola resistencia y otra fuente de tensión. (*b*) Verifique que la fuente de 7 V suministre la misma cantidad de potencia en ambos circuitos.



■ **FIGURA 5.63**

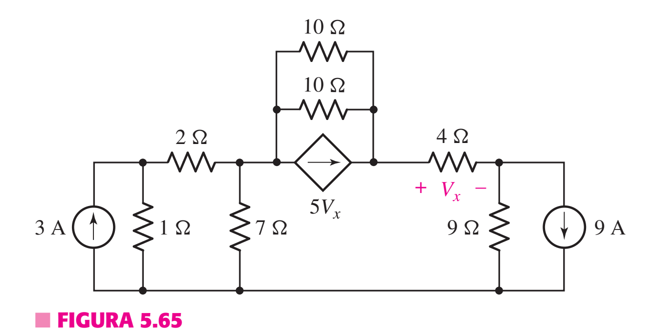


20. (*a*) Usando transformaciones de fuentes sucesivas, reduzca el circuito de la figura 5.64 de tal manera que contenga una sola fuente de tensión, la resistencia de 17 Ω y sólo otra resistencia. (*b*) Calcule la potencia disipada por la resistencia de 17 Ω. (*c*) Verifique sus resultados simulando ambos circuitos con PSpice u otra herramienta CAD adecuada.



■ **FIGURA 5.64**

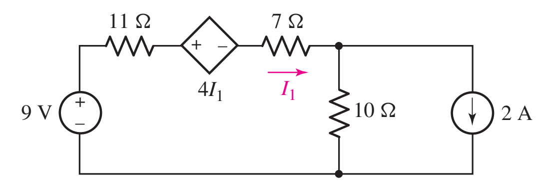
21. Use transformaciones de fuentes para convertir primero las tres fuentes de la figura 5.65 a fuentes de tensión; en seguida simplifique el circuito tanto como sea posible y calcule la tensión V_x que aparece a través la resistencia de 4 Ω. Asegúrese de dibujar y etiquetar su circuito simplificado.



■ **FIGURA 5.65**

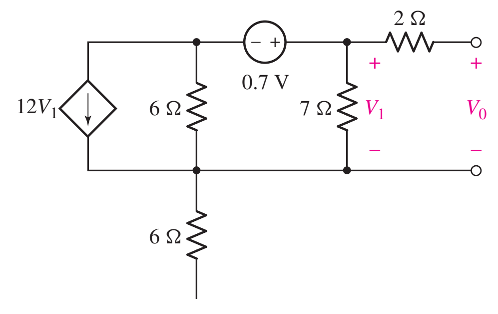


22. (*a*) Con la ayuda de transformaciones de fuentes, modifique el circuito de la figura 5.66 de manera que contenga sólo fuentes de corriente. (*b*) Simplifique su nuevo circuito tanto como sea posible y calcule la potencia disipada en la resistencia de 7 Ω. (*c*) Verifique su solución simulando ambos circuitos con PSpice u otra herramienta CAD adecuada.



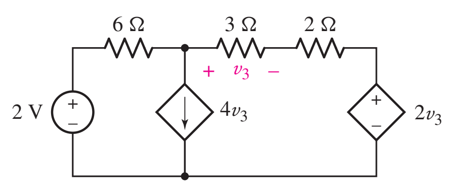
■ **FIGURA 5.66**

23. Transforme la fuente dependiente en la figura 5.67 en una fuente de tensión. Luego calcule V_0.

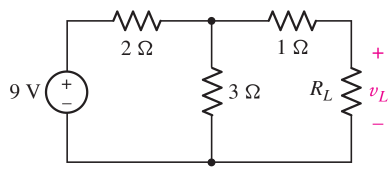


■ **FIGURA 5.67**

24. Respecto al circuito representado en la figura 5.68, transforme primero ambas fuentes de tensión a fuentes de corriente, reduzca el número de elementos tanto como sea posible y determine la tensión v_3.



■ **FIGURA 5.68**



■ **FIGURA 5.69**

5.3 Circuitos equivalentes de Thévenin y Norton

25. (*a*) Con referencia a la figura 5.69, determine el equivalente de Thévenin de la red conectada a R_L. (*b*) Determine v_L para $R_L = 1$ Ω, 3.5 Ω, 6.257 Ω y 9.8 Ω.

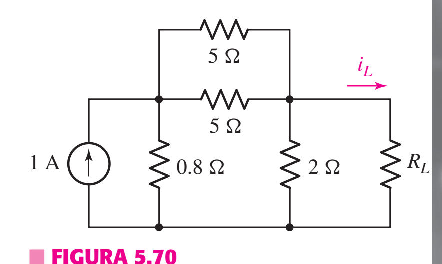
26. (*a*) Respecto al circuito representado en la figura 5.69, obtenga el equivalente de Norton de la red conectada a R_L. (*b*) Grafique la potencia disipada en la resistencia R_L como una función de i_L correspondiente al rango de $0 < R_L < 5$ Ω. (*c*) Usando su gráfica, estime qué valor de R_L alcanza su valor máximo de potencia disipada.

27. (*a*) Obtenga el equivalente de Norton de la red conectada a R_L en la figura 5.70. (*b*) Obtenga el equivalente de Thévenin de la misma red. (*c*) Use cualquiera de los equivalentes para calcular i_L para $R_L = 0$ Ω, 1 Ω, 4.923 Ω y 8.107 Ω.

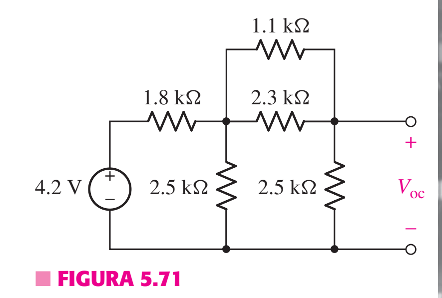
28. (*a*) Determine el equivalente de Thévenin del circuito representado en la figura 5.71 hallando primero V_{oc} e I_{sc} (definida como la corriente que fluye de la terminal de referencia positiva de V_{oc}). (*b*) Conecte una resistencia de 4.7 kΩ a las terminales abiertas de su nueva red y calcule la potencia que disipa.

29. Con referencia al circuito de la figura 5.71: (*a*) Determine el equivalente de Norton del circuito encontrando primero V_{oc} e I_{sc} (definida como la corriente que fluye de la terminal de referencia positiva de V_{oc}). (*b*) Conecte una resistencia de 1.7 kΩ a las terminales abiertas de su nueva red y calcule la potencia suministrada a dicha resistencia.

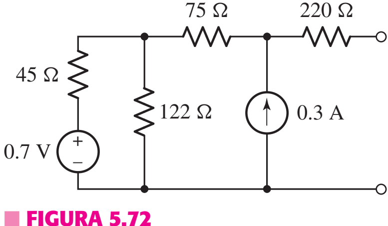
30. (*a*) Utilice el teorema de Thévenin para obtener un equivalente sencillo de dos componentes del circuito que se muestra en la figura 5.72. (*b*) Use su circuito equivalente para determinar la potencia suministrada a una resistencia de 100 Ω conectada en las terminales a circuito abierto. (*c*) Verifique su solución mediante el análisis del circuito original con la misma resistencia de 100 Ω conectada a través de las terminales a circuito abierto.



■ **FIGURA 5.70**



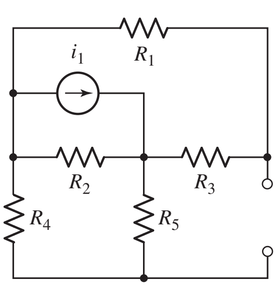
■ **FIGURA 5.71**



■ **FIGURA 5.72**

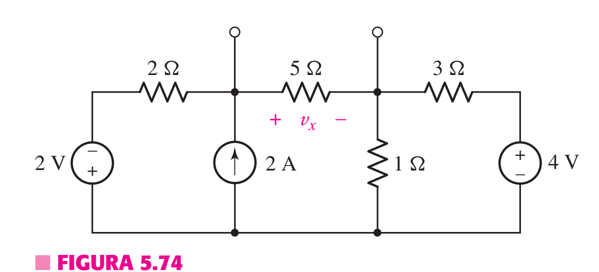


31. (*a*) Utilice el teorema de Thévenin para obtener un equivalente de dos componentes para la red que se muestra en la figura 5.73. (*b*) Determine la potencia suministrada a una resistencia de 1 MΩ conectada a la red si $i_1 = 19\ \mu$A, $R_1 = R_2 = 1.6$ MΩ, $R_2 = 3$ MΩ y $R_4 = R_5 = 1.2$ MΩ. (*c*) Verifique su solución mediante la simulación de ambos circuitos con PSpice u otra herramienta CAD adecuada.



■ **FIGURA 5.73**

32. Determine el equivalente de Thévenin de la red que se muestra en la figura 5.74 visto desde las dos terminales a circuito abierto.

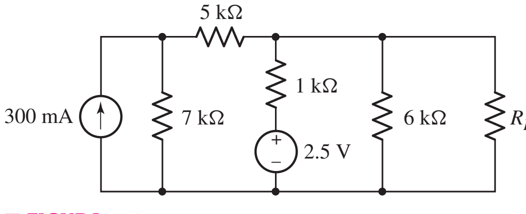


■ **FIGURA 5.74**

33. (*a*) Determine el equivalente de Norton del circuito representado en la figura 5.74 visto desde las dos terminales a circuito abierto. (*b*) Calcule la potencia disipada en la resistencia de 5 Ω conectada en paralelo con la resistencia existente de 5 Ω. (*c*) Calcule la corriente que fluye a través de un cortocircuito que conecta las dos terminales.

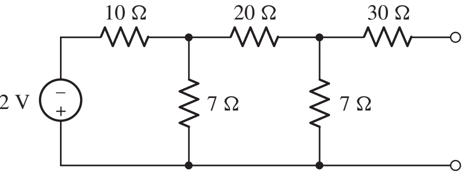


34. Para el circuito de la figura 5.75: (*a*) Utilice el teorema de Norton para reducir la red conectada a R_L a sólo dos componentes. (*b*) Calcule la corriente dirigida hacia abajo que fluye a través de R_L si es una resistencia de 3.3 kΩ. (*c*) Verifique su respuesta mediante la simulación de ambos circuitos con PSpice u otra herramienta CAD comparable.



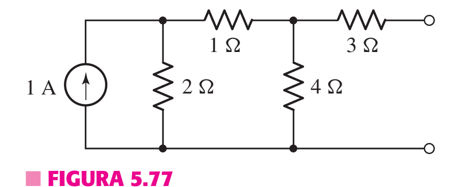
■ **FIGURA 5.75**

35. (*a*) Obtenga el valor para la resistencia equivalente de Thévenin vista desde las terminales a circuito abierto del circuito de la figura 5.76, hallando primero V_{oc} e I_{sc}. (*b*) Conecte una fuente de prueba de 1 A a las terminales abiertas del circuito original después de cortocircuitar la fuente de tensión, y use esto para obtener R_{TH}. (*c*) Conecte una fuente de prueba de 1 V en las terminales a circuito abierto del circuito original, después de poner nuevamente en cero la fuente de 2 V, y ahora obtenga R_{TH}.



■ **FIGURA 5.76**

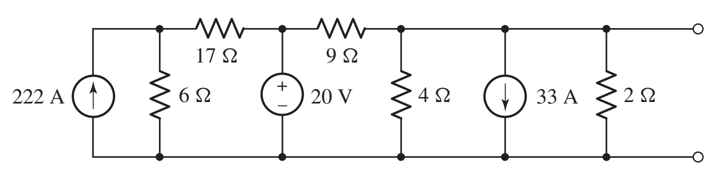
36. Con referencia al circuito representado en la figura 5.77, (*a*) obtenga el valor para la resistencia equivalente de Thévenin vista desde las terminales abiertas, hallando primero V_{oc} e I_{sc}. (*b*) Conecte una fuente de prueba de 1 A en las terminales abiertas del circuito, después



■ **FIGURA 5.77**

de desactivar la otra fuente de corriente, y ahora obtenga R_{TH}. (*c*) Conecte una fuente de prueba de 1 V en las terminales a circuito abierto del circuito original, nuevamente poniendo en cero la fuente original, y ahora use esto para obtener R_{TH}.

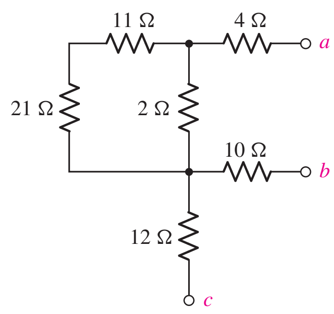
37. Obtenga el valor para la resistencia equivalente de Thévenin vista desde las terminales a circuito abierto del circuito en la figura 5.78 (*a*) determinando V_{oc} e I_{sc} y luego tomando su razón (voltaje entre la corriente); (*b*) poniendo todas las fuentes independientes en cero y usando técnicas de combinación de resistencias; (c) conectando una fuente de corriente no conocida en las terminales, desactivando (poniendo en cero) todas las otras fuentes, encontrando una expresión algebraica para la tensión presente a través de la fuente, y tomando la razón entre las dos cantidades.



■ **FIGURA 5.78**

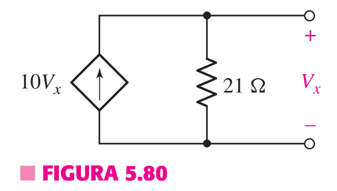


38. Respecto a la red representada en la figura 5.79, determine el equivalente de Thévenin visto desde un elemento conectado a las terminales. (*a*) *a* y *b*; (*b*) *a* y *c*; (*c*) *b* y *c*; (*d*) verifique sus respuestas usando PSpice u otra herramienta CAD adecuada. (*Pista*: *conecte una fuente de prueba* en *las terminales de interés*.)



■ **FIGURA 5.79**

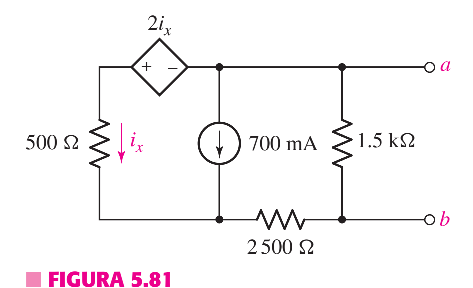
39. Determine los equivalentes de Thévenin y Norton del circuito representado en la figura 5.80 visto desde las terminales a circuito abierto. (No debe haber ninguna fuente dependiente en su respuesta.)



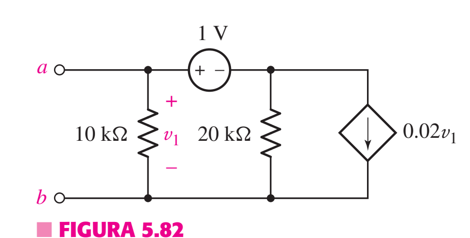
■ **FIGURA 5.80**

40. Determine el equivalente de Norton del circuito dibujado en la figura 5.81 visto desde las terminales *a* y *b*. (No debe haber fuentes dependientes en su respuesta.)

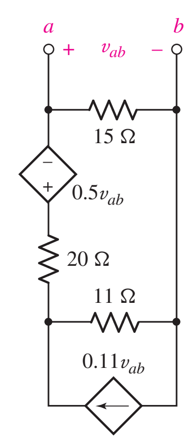
41. Respecto al circuito de la figura 5.82, determine la potencia disipada por (*a*) una resistencia de 1 kΩ conectada entre *a* y *b*; (*b*) una resistencia de 4.7 kΩ conectada entre *a* y *b*; (*c*) una resistencia de 10.54 kΩ conectada entre *a* y *b*.



■ **FIGURA 5.81**



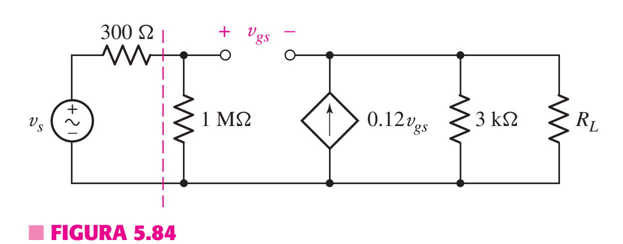
■ **FIGURA 5.82**



■ **FIGURA 5.83**

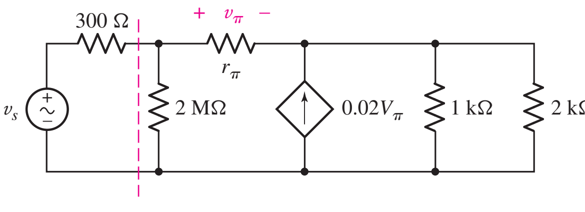
42. Determine los equivalentes de Thévenin y Norton del circuito que se muestra en la figura 5.83, visto desde un elemento no especificado conectado entre las terminales *a* y *b*.

43. Con base en el circuito de la figura 5.84, determine la resistencia equivalente de Thévenin del circuito que está a la derecha de la línea punteada. El circuito es un amplificador transistorizado de fuente común del que usted está calculando su resistencia de entrada.



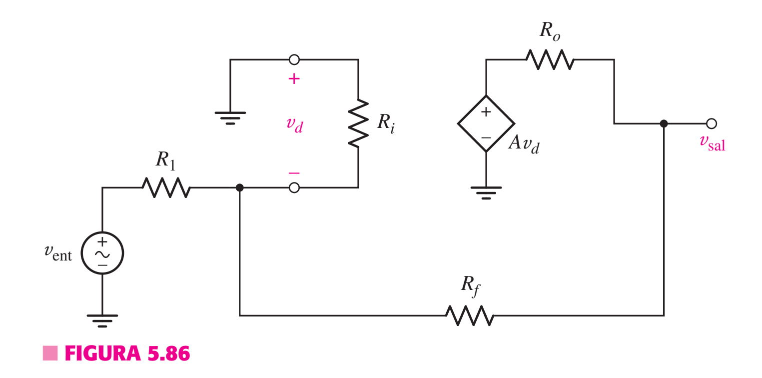
■ **FIGURA 5.84**

44. En el circuito de la figura 5.85 obtenga la resistencia equivalente de Thévenin del circuito que está a la derecha de la línea punteada; es un amplificador transistorizado de colector común del cual se está calculando la resistencia de entrada.



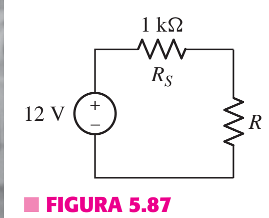
■ **FIGURA 5.85**

45. El circuito que se muestra en la figura 5.86 es un modelo razonablemente aproximado de un amplificador operacional. En casos donde R_1 y A son muy grandes y $R_o \sim 0$, una carga resistiva (como por ejemplo una bocina) conectada entre tierra y la terminal marcada v_{sal} verán una tensión $-R_f/R_1$ veces más grandes que la señal de entrada v_{entr}. Determine el equivalente de Thévenin del circuito y recuerde marcar v_{sal}.



■ **FIGURA 5.86**

5.4 Transferencia de potencia máxima

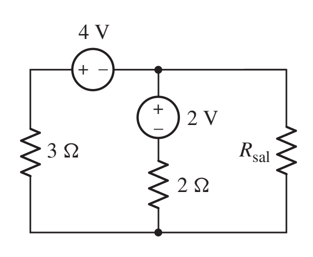


■ **FIGURA 5.87**

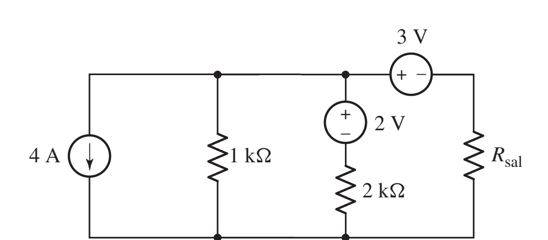
46. (*a*) Para el circuito sencillo de la figura 5.87, grafique la potencia disipada por la resistencia R como función de R/R_S si $0 \leq R \leq 3\,000$ Ω. (*b*) Grafique la primera derivada de la potencia contra R/R_S, y verifique que se transfiere potencia máxima a R cuando ésta es igual a R_S.

47. Para el circuito dibujado en la figura 5.88, (*a*) determine el equivalente de Thévenin conectado a R_{sal}. (*b*) Elija R_{sal} de manera que se le suministre máxima potencia.

48. Estudie el circuito de la figura 5.89. (*a*) Determine el equivalente de Norton conectado a la resistencia R_{sal}. (*b*) Seleccione el valor para R_{sal} tal que se le suministre potencia máxima.



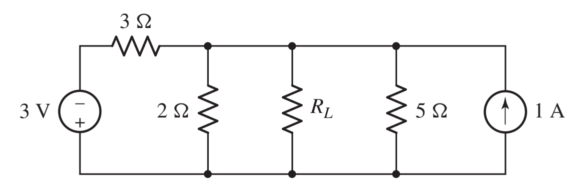
■ **FIGURA 5.88**



■ **FIGURA 5.89**

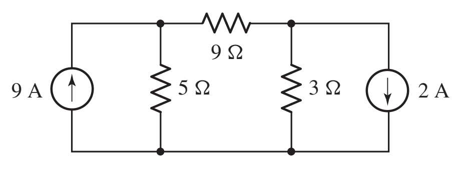
49. Suponiendo que se pueda determinar la resistencia equivalente de Thévenin del tomacorriente de pared, ¿por qué los fabricantes de tostadores, hornos de microondas y televisiones no igualan la resistencia equivalente de Thévenin de cada aparato con dicho valor? Éste no permitiría transferencia de potencia máxima desde la compañía eléctrica hasta los aparatos domésticos?

50. Para el circuito de la figura 5.90, ¿qué valor de R_L asegurará que absorbe la cantidad de potencia máxima posible?



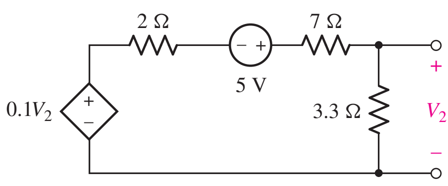
■ **FIGURA 5.90**

51. Con referencia al circuito de la figura 5.91, (*a*) calcule la potencia absorbida por la resistencia de 9 Ω; (*b*) ajuste el valor de la resistencia de 5 Ω de modo que la nueva red suministre potencia máxima a la resistencia de 9 Ω.



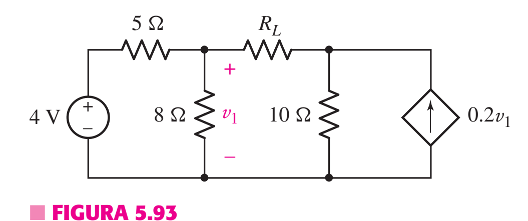
■ **FIGURA 5.91**

52. Con referencia al circuito de la figura 5.92, (*a*) determine la potencia absorbida por la resistencia de 3.3 Ω; (*b*) reemplace la resistencia de 3.3 Ω por otra resistencia tal que absorba potencia máxima del resto del circuito.



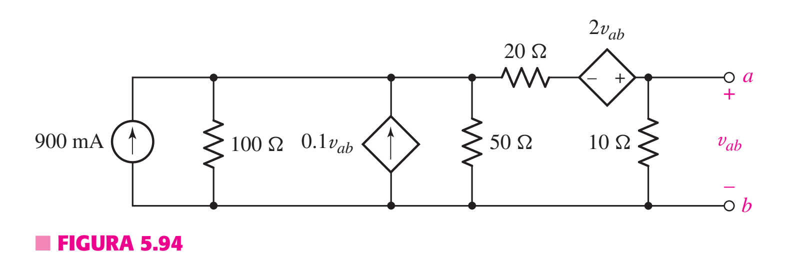
■ **FIGURA 5.92**

53. Seleccione en la figura 5.93 un valor para R_L tal que se asegure que absorba potencia máxima del circuito.



■ **FIGURA 5.93**

54. Determine qué valor de resistencia absorbería potencia máxima del circuito de la figura 5.94 cuando se conecte a través de las terminales *a* y *b*.

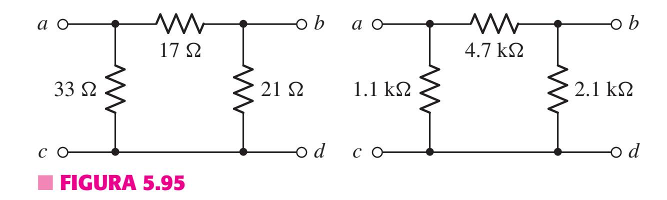


■ **FIGURA 5.94**

5.5 Conversión delta-estrella

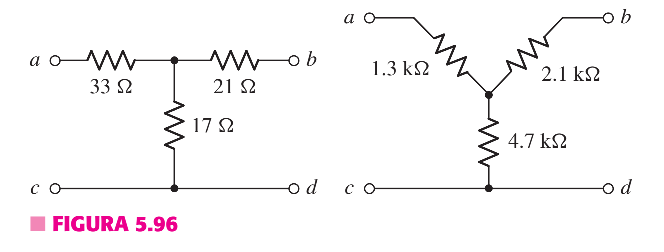
55. Deduzca las ecuaciones necesarias para convertir de una red conectada en estrella a una red conectada en Δ.

56. Convierta las redes conectadas en Δ (o en "Π") en la figura 5.95 a redes conectadas en estrella.

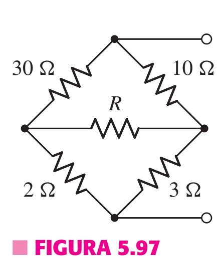


■ **FIGURA 5.95**

57. Convierta las redes conectadas en Y (o en "T") en la figura 5.96 a redes conectadas en Δ.



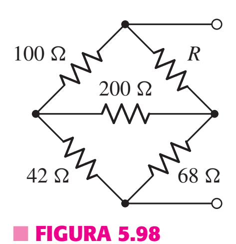
■ **FIGURA 5.96**



■ **FIGURA 5.97**

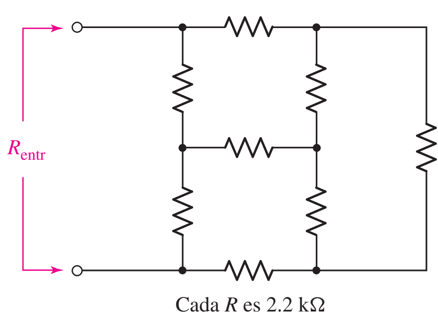
58. Para la red de la figura 5.97, seleccione un valor de *R* tal que la red tenga una resistencia equivalente de 9 Ω. Redondee su respuesta a dos cifras significativas.

59. Para la red de la figura 5.98, seleccione un valor de R tal que la red tenga una resistencia equivalente de 70.6 Ω.



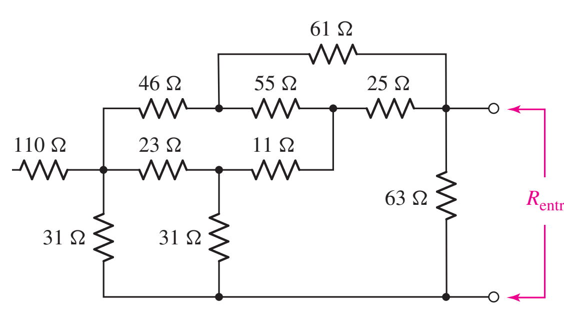
■ **FIGURA 5.98**

60. Determine la resistencia efectiva R_{ent} de la red que se muestra en la figura 5.99.



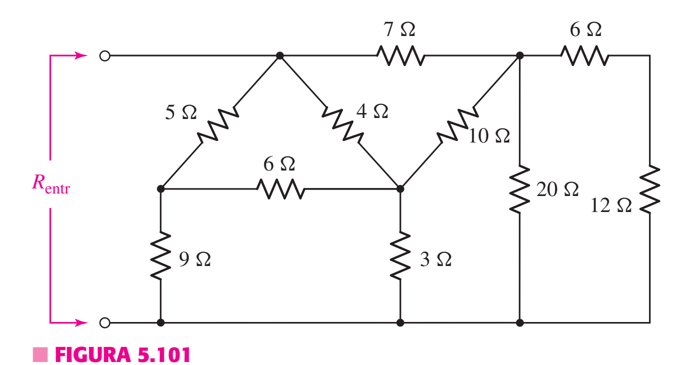
■ **FIGURA 5.99**

61. Calcule R_{ent} como se indica en la figura 5.100.



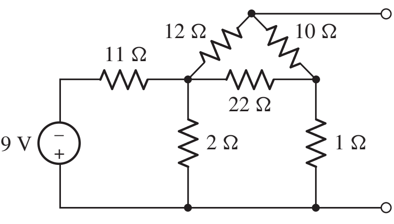
■ **FIGURA 5.100**

62. Utilice las técnicas de conversión Δ/Y como sea adecuado para determinar R_{ent} etiquetada en la figura 5.101.



■ **FIGURA 5.101**

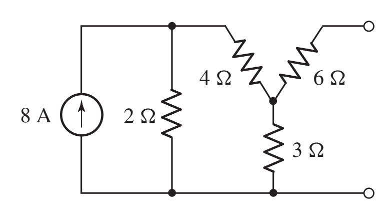
63. (*a*) Determine el equivalente de Thévenin de dos componentes de la red de la figura 5.102. (*b*) Calcule la potencia disipada por una resistencia de 1 Ω conectada entre las terminales abiertas.



■ **FIGURA 5.102**



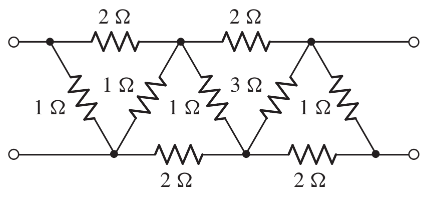
64. (*a*) Use las técnicas adecuadas para obtener los equivalentes tanto de Thévenin como de Norton de la red dibujada en la figura 5.103. (*b*) Verifique sus respuestas simulando cada uno de los tres circuitos conectados a una resistencia de 1 Ω.



■ **FIGURA 5.103**



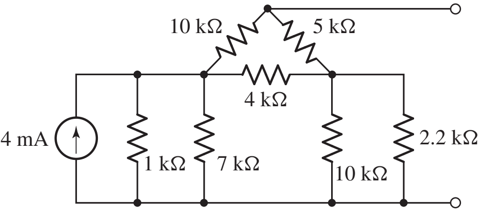
65. (a) Sustituya la red de la figura 5.104 por una red equivalente en Δ de tres resistencias.
(b) Efectúe una análisis con PSpice para verificar que su respuesta es, en realidad, equivalente. (*Sugerencia:* Trate de agregar una resistencia de carga.)



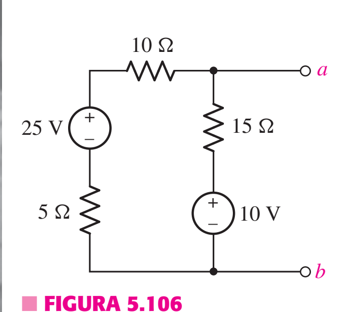
■ **FIGURA 5.104**

5.6 Selección de un procedimiento: comparación de diversas técnicas

66. Determine la potencia absorbida por una resistencia conectada entre las terminales a circuito abierto del circuito que se muestra en la figura 5.105 si tiene un valor de (*a*) 1 Ω; (*b*) 100 Ω; (*c*) 2.65 kΩ; (*d*) 1.13 MΩ.



■ **FIGURA 5.105**

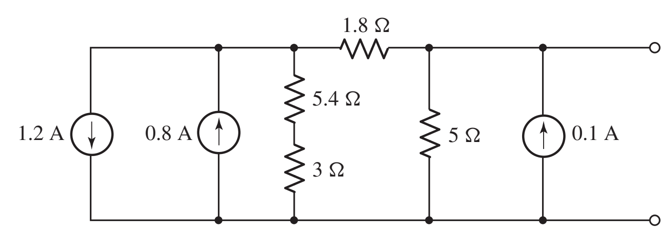


■ **FIGURA 5.106**

67. Se sabe que una resistencia de carga de algún tipo se conectará entre las terminales *a* y *b* de la red de la figura 5.106. (*a*) Cambie el valor de la fuente de 25 V de manera que ambas fuentes de tensión contribuyan por igual a la potencia suministrada a la resistencia de carga, suponiendo que su valor se elige de tal manera que absorba potencia máxima. (*b*) Calcule el valor de la resistencia de carga.

68. Se conecta una carga de 2.57 Ω entre las terminales *a* y *b* de la red dibujada en la figura 5.106. Desafortunadamente, la potencia que se suministra a la carga es sólo el 50% de la cantidad necesaria. Alterando sólo las fuentes de tensión, modifique el circuito de tal manera que se suministre la carga necesaria y ambas fuentes contribuyan por igual.

69. Se conecta una resistencia de carga entre las terminales a circuito abierto del circuito que se muestra en la figura 5.107, y su valor se eligió cuidadosamente para asegurar máxima transferencia de potencia del resto del circuito. (*a*) ¿Cuál es el valor de la resistencia? (*b*) Si la potencia absorbida por la resistencia de carga es tres veces mayor que la necesaria, modifique el circuito de manera que funcione como se desea, sin perder la condición de transferencia de potencia máxima de la que ya se dispone.



■ **FIGURA 5.107**

70. Se necesita un respaldo para el circuito que se muestra en la figura 5.107. No se sabe lo que se conectará a las terminales abiertas, o si será puramente lineal. Si se va a usar una simple batería, ¿qué tensión sin carga (en "circuito abierto") debe tener, y cuál es la resistencia interna máxima tolerable?

Ejercicios de integración de capítulo



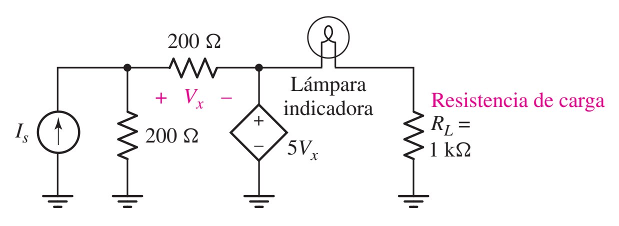


71. Tres focos eléctricos de 45 W alambrados originalmente en una configuración de red en Y con una fuente de 120 V ca conectada en cada puerto se vuelve a alambrar como una red en Δ. No se usa la conexión neutra, o central. Si la intensidad de cada luz es proporcional a la potencia que toma, diseñe un circuito de potencia de 120 V ca, de manera que las tres luces tengan la misma intensidad en la configuración en Δ que tenían cuando estaban en una configuración en Y. Verifique su diseño con PSpice al comparar la potencia extraída por cada luz de su circuito (cuyo modelo es un valor de resistencia elegido de manera apropiada), con la potencia que cada uno extraería en el circuito original conectado en Y.

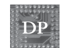
72. (*a*) Explique en términos generales cómo se puede usar la transformación de fuentes para simplificar un circuito antes del análisis. (*b*) Aunque las transformaciones de fuentes puedan simplificar notablemente un circuito específico, ¿cuándo puede no valer la pena el esfuerzo? (*c*) Multiplicando todas las fuentes independientes en un circuito por el mismo factor de escalamiento da como resultado que las otras tensiones y corrientes se escalen en la misma cantidad. Explique por qué no escalamos también las fuentes dependientes. (*d*) En un circuito general, si ponemos en cero una fuente independiente de tensión, ¿qué corriente puede fluir a través de ella? (*e*) En un circuito general, si ponemos en cero una fuente independiente de corriente, ¿qué tensión se puede mantener entre sus terminales?



73. La resistencia de carga en la figura 5.108 puede disipar con seguridad hasta 1 W antes de sobrecalentarse y estallar en llamas. La lámpara se puede considerar como una resistencia de 10.6 Ω si a través de ella fluye menos que 1 A, y como una resistencia de 15 Ω si fluye a través de ella más de 1 A. ¿Cuál es el valor máximo permisible de I_s? Verifique su respuesta con PSpice.



■ **FIGURA 5.108**



74. Cierto LED rojo tiene un valor nominal de corriente máxima de 35 mA; si se excede este valor, se producirá un sobrecalentamiento y una falla catastrófica. La resistencia del LED es una función no lineal de su corriente, pero el fabricante garantiza una resistencia mínima de 47 Ω y una máxima de 117 Ω. Sólo se cuenta con una batería de 9 V para activar al LED. Diseñe un circuito adecuado para suministrar la potencia máxima posible al LED sin dañarlo. Utilice sólo combinaciones de los valores de resistencias estándar dados en la contraportada de la portada.



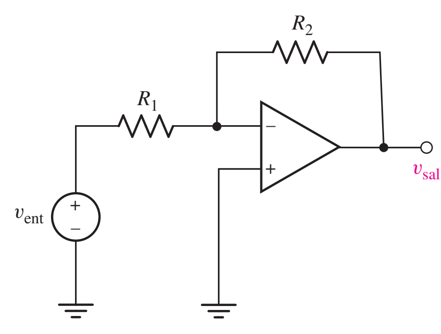
75. Como parte de un sistema de seguridad, un alambre muy delgado de 100 Ω se adhiere a una ventana mediante pegamento epóxico no conductor. Si se cuenta sólo con una caja de 12 baterías AAA de 1.5 V recargables, con mil resistencias de 1 Ω y un piezo zumbador de 2 900 Hz requiere 15 mA, a 6 V, diseñe un circuito sin partes móviles que active el zumbador al romperse la ventana (y consecuentemente también se rompe el alambre delgado). Observe que para funcionar, el zumbador requiere una tensión de cd de al menos 6 V (28 V máximo).

George A. Philbrick Researches, Inc, *Applications Manual for Computing Amplifiers for Modelling, Measuring, Manipulating & Much Else*. Norwood, Mass.: Analog Devices, 1998.

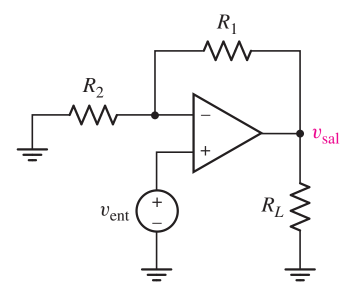
EJERCICIOS

6.2 El amp op ideal

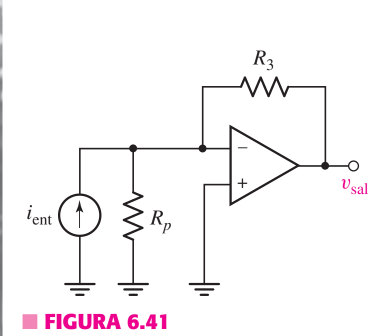
1. Para el circuito amp op que se muestra en la figura 6.39, calcule v_{sal} si (*a*) $R_1 = R_2 = 100\ \Omega$ y $v_{ent} = 5$ V; (*b*) $R_2 = 200\ R_1$ y $v_{ent} = 1$ V; (*c*) $R_1 = 4.7$ kΩ, $R_2 = 47$ kΩ, y $v_{ent} = 20$ sen $5t$ V.




■ FIGURA 6.39



■ FIGURA 6.40



■ FIGURA 6.41

2. Determine la potencia disipada por una resistencia de 100 Ω conectada entre tierra y la terminal de salida del amp op de la figura 6.39 si $v_{ent} = 4$V y (*a*) $R_1 = 2\ R_2$; (*b*) $R_1 = 1$ kΩ y $R_2 = 22$ kΩ; (*c*) $R_1 = 100\ \Omega$ y $R_2 = 101\ \Omega$.

3. Conecte una resistencia de 1 Ω entre tierra y la terminal de salida del amp op de la figura 6.39, y grafique $v_{sal}(t)$ si (*a*) $R_1 = R_2 = 10\ \Omega$ y $v_{ent} = 5$ sen $10t$ V; (*b*) $R_1 = 0.2R_2 = 1$ kΩ, y $v_{ent} = 5$ cos $10t$ V; (*c*) $R_1 = 10\ \Omega$, $R_2 = 200\ \Omega$, y $v_{ent} = 1.5 + 5e^{-t}$ V.

4. Para el circuito de la figura 6.40, calcule v_{sal} si (*a*) $R_1 = R_2 = 100$ kΩ, $R_L = 100\ \Omega$ y $v_{ent} = 5$ V; (*b*) $R_1 = 0.1R_2$, $R_L = \infty$ y $v_{ent} = 2$ V; (*c*) $R_1 = 1$ kΩ, $R_2 = 0$, $R_L = 1\ \Omega$, y $v_{ent} = 43.5$ V.



5. (*a*) Diseñe un circuito que convierta una tensión $v_1(t) = 4$ cos $5t$ V en 9 sen $5t$ V. (*b*) Verifique su diseño analizando el circuito final.



6. Cierta resistencia de carga necesita un suministro constante de 5 V cd. Por desgracia, su valor de resistencia cambia con la temperatura. Diseñe un circuito que suministre la tensión requerida si sólo se dispone de baterías de 9 V y resistencias estándar con valores con 10% de tolerancia.

7. Para el circuito de la figura 6.40, $R_1 = R_L = 50\ \Omega$. Calcule el valor de R_2 necesario para suministrar 5 W a R_L si V_{ent} es igual a (*a*) 5 V; (*b*) 1.5 V. (*c*) Repita (*a*) y (*b*) si R_L se reduce a 22 Ω.

8. Calcule v_{sal} del circuito de la figura 6.41 si (*a*) $i_{ent} = 1$ mA, $R_p = 2.2$ kΩ, y $R_3 = 1$ kΩ; (*b*) $i_{ent} = 2$ A, $Rp = 1.1\ \Omega$, y $R_3 = 8.5\ \Omega$. (*c*) Para cada caso, indique si el circuito está alambrado como un amplificador inversor o no inversor. *Explique su razonamiento*.



9. (*a*) Diseñe un circuito usando solamente un solo amp op que sume dos tensiones v_1 y v_2 y produzca una tensión de salida del doble de su suma (es decir, $v_{sal} = 2\ v_1 + 2\ v_2$). (*b*) Verifique su diseño mediante análisis del circuito final.



10. (*a*) Diseñe un circuito que suministre una corriente *i* que es igual en magnitud a la suma de tres tensiones de entrada v_1, v_2 y v_3. (Compare volts con amperes). (*b*) Verifique su diseño mediante análisis del circuito final.

11. (*a*) Diseñe un circuito que suministre v_{sal} que sea igual a la diferencia entre dos tensiones v_2 y v_1 (es decir, $v_{sal} = v_2 - v_1$) si usted tiene solamente las siguientes resistencias entre

las cuales elegir: dos resistencias de 1.5 kΩ, cuatro de 6 kΩ o tres de 500 Ω.
(*b*) Verifique su diseño mediante análisis del circuito final.

12. Analice el circuito de la figura 6.42 y determine un valor para V_1, con referencia a tierra.

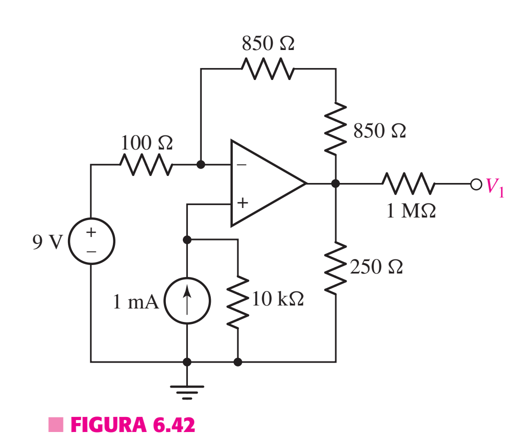


FIGURA 6.42

13. Deduzca una expresión para v_{sal} como función de v_1 y v_2 para el circuito representado en la figura 6.43.

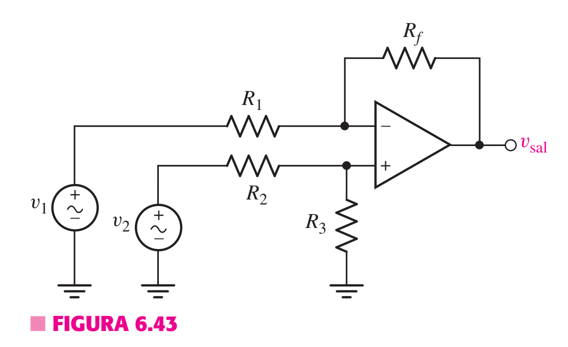


FIGURA 6.43

14. Explique lo que está equivocado en cada diagrama de la figura 6.44 si se sabe que los dos amp op son *perfectamente ideales*.

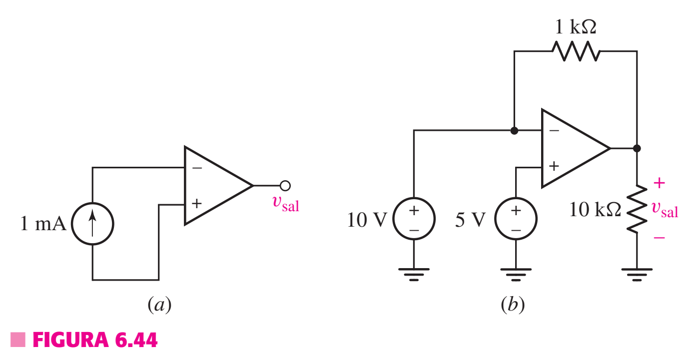


FIGURA 6.44

15. Para el circuito representado en la figura 6.45, calcule v_{sal} si $I_S = 2$ mA, $R_Y = 4.7$ kΩ, $R_X = 1$ kΩ y $R_f = 500$ Ω.

16. Considere el circuito amplificador que se muestra en la figura 6.45. ¿Qué valor de R_f dará $v_{sal} = 2$ V cuando $I_s = -10$ mA y $R_Y = 2\,R_X = 500$ Ω?

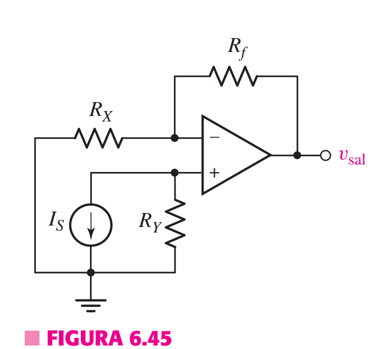
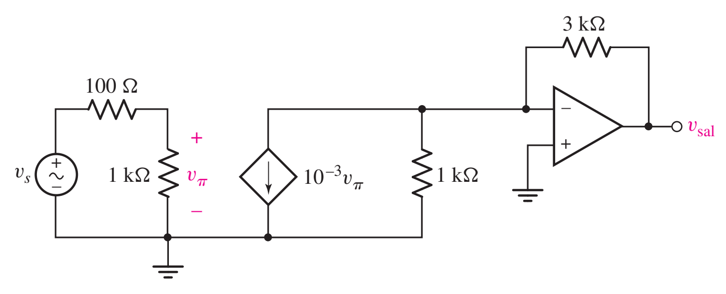


FIGURA 6.45

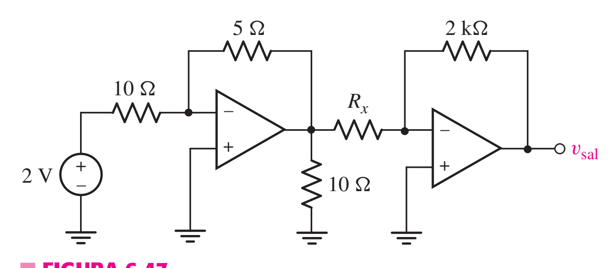
17. Respecto al circuito que se muestra en la figura 6.46, calcule v_{sal} si v_s es igual a (*a*) 2 cos 100*t* mV; (*b*) 2 sen($4t + 19°$) V.



■ **FIGURA 6.46**

6.3 Etapas en cascada

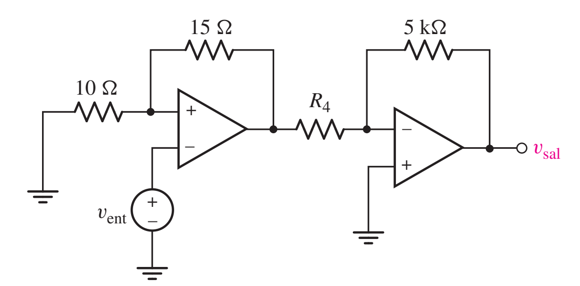
18. Calcule v_{sal} marcada en el circuito de la figura 6.47 si $R_x = 1$ kΩ.



■ **FIGURA 6.47**

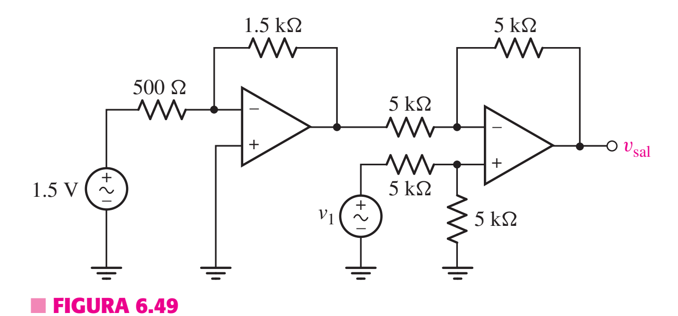
19. Para el circuito de la figura 6.47, determine el valor de R_x que dará como resultado un valor de $v_{sal} = 10$ V.

20. Con referencia a la figura 6.48, grafique v_{sal} como función de (*a*) v_{ent} dentro del rango de $-2\text{ V} \leq v_{ent} \leq +2$ V, si $R_4 = 2$ kΩ; (*b*) R_4 dentro del rango de $1\text{ kΩ} \leq R_4 \leq 10$ kΩ si $v_{ent} = 300$ mV.



■ **FIGURA 6.48**

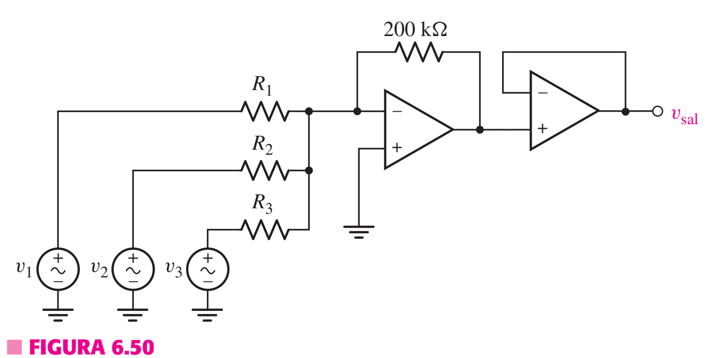
21. Obtenga una expresión para v_{sal} marcada en el circuito de la figura 6.49 si v_1 es igual a (*a*) 0 V; (*b*) 1 V; (*c*) −5 V; (*d*) 2 sen 100*t* V.



■ **FIGURA 6.49**

22. La fuente de 1.5 V de la figura 6.49 está desconectada y, en su lugar, la salida del circuito que se muestra en la figura 6.48 se conecta en la terminal del lado izquierdo de la resistencia de 500 Ω. Calcule v_{sal} si $R_4 = 2$ kΩ y (*a*) $v_{ent} = 2$ V, $v_1 = 1$ V; (*b*) $v_{ent} = 1$ V, $v_1 = 0$; (*c*) $v_{ent} = 1$ V, $v_1 = -1$ V.

23. Para el circuito que se muestra en la figura 6.50, calcule v_{sal} si (*a*) $v_1 = 2v_2 = 0.5v_3 = 2.2$ V y $R_1 = R_2 = R_3 = 50$ kΩ; (*b*) $v_1 = 0$, $v_2 = -8$ V, $v_3 = 9$ V y $R_1 = 0.5R_2 = 0.4R_3 = 100$ kΩ.



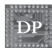

■ **FIGURA 6.50**



24. (*a*) Diseñe un circuito que sume las tensiones producidas por tres sensores de presión separados, cada uno dentro del rango de $0 \leq v_{sensor} \leq 5$ V, y produzca un tensión positiva v_{sal} linealmente correlacionada con la suma de tensiones, de manera que $v_{sal} = 0$ cuando las tres tensiones sean cero, y $v_{sal} = 2$ V cuando las tres tensiones estén en su máximo. (*b*) Verifique su diseño mediante el análisis del circuito final.



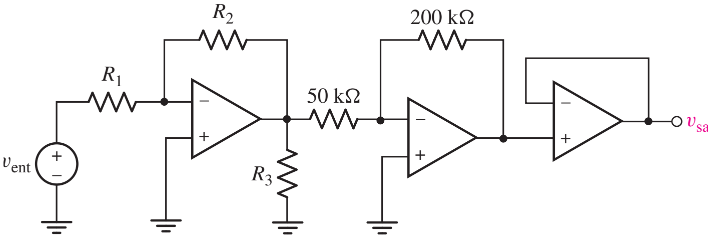
25. (*a*) Diseñe un circuito que produzca una tensión de salida v_{sal} proporcional a la diferencia entre dos tensiones positivas v_1 y v_2 de tal manera que $v_{sal} = 0$ cuando ambas tensiones sean iguales, y $v_{sal} = 10$ V cuando $v_1 - v_2 = 1$ V. (*b*) Verifique su diseño analizando el circuito final.



26. (*a*) Se usan tres sensores de presión sensitiva para hacer una verificación doble de las lecturas de peso obtenidas de los sistemas de suspensión de un avión jet de largo alcance. Cada sensor está calibrado de manera que 10 μV correspondan a 1 kg. Diseñe un circuito que sume las tres señales de tensión para producir una tensión de salida calibrada de tal manera que 10 V correspondan a 400 000 kg, el máximo peso de despegue del avión. (*b*) Verifique su diseño mediante el análisis del circuito final.

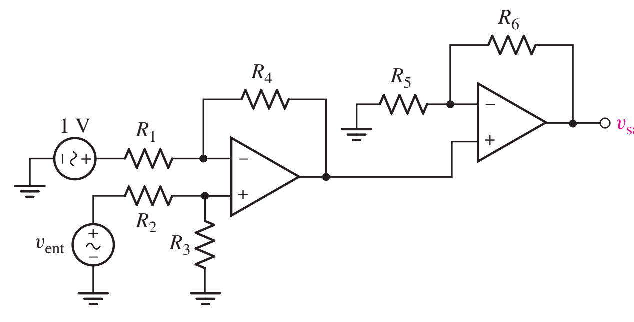


27. (*a*) El suministro de oxígeno para una batiesfera dada consiste en cuatro tanques separados, cada uno equipado con un sensor de presión capaz de medir entre 0 (correspondiente a una salida de 0 V) y 500 bars (correspondiente a una salida de 5 V). Diseñe un circuito que produzca una tensión proporcional a la presión total en todos los tanques, de manera que 1.5 V corresponda a 0 bars y 3 V corresponda a 2 000 bars. (*b*) Verifique su diseño analizando el circuito final.



■ **FIGURA 6.51**

29. Para el circuito de la figura 6.52, deduzca una expresión para v_{sal} en términos de v_{ent}.

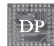


■ **FIGURA 6.52**

6.4 Circuitos para fuentes de tensión y de corriente



30. Construya un circuito basado en el diodo 1N4740, que da una tensión de referencia de 10 V si únicamente hay disponibles baterías de 9 V. Observe que la tensión de ruptura de este diodo es igual a 10 V a una corriente de 25 mA.



31. Utilice un diodo Zener 1N4733 para construir un circuito que suministre una tensión de referencia de 4 V a una carga de 1 kΩ, si únicamente hay disponibles baterías de 9 V como fuentes. Observe que la tensión de ruptura Zener de este diodo es de 5.1 V a una corriente de 76 mA.



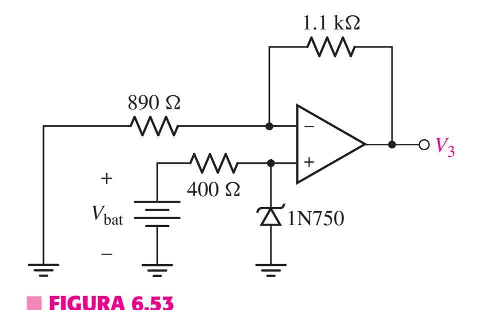
32. (*a*) Diseñe un circuito que suministre una tensión de referencia de 5 V de cd a una carga de resistencia desconocida (diferente de cero), si únicamente hay disponible una batería de 9 V como suministro. (*b*) Verifique su diseño mediante una simulación adecuada. Como parte de esto, determine el rango aceptable para la resistencia de carga.



33. Una red pasiva dada se puede representar por una resistencia equivalente de Thévenin entre 10 y 125 Ω, dependiendo de la temperatura de operación. (*a*) Diseñe un circuito que proporcione 2.2 V constantes a esta red, independientemente de la temperatura. (*b*) Verifique su diseño mediante una simulación adecuada (la resistencia se puede variar desde dentro de una sola simulación, como se describe en el capítulo 8).



34. Calcule la tensión V_1 marcada en el circuito de la figura 6.53 si la batería tiene una tensión nominal V_{bat} igual a (*a*) 9 V; (*b*) 12 V. (*c*) Verifique sus soluciones con simulaciones adecuadas, comentando sobre el posible origen de cualquier discrepancia.



■ **FIGURA 6.53**



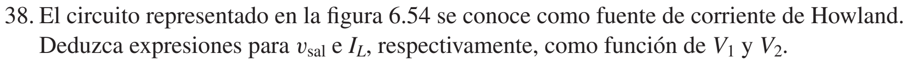
35. (*a*) Diseñe una fuente de corriente basada en el diodo 1N750, que es capaz de suministrar una corriente cd de 750 μA a una carga R_L, de tal manera que 1 kΩ < R_L < 50 kΩ. (*b*) Verifique su diseño mediante una simulación adecuada (observe que la resistencia se puede variar dentro de una sola simulación, como se describe en el capítulo 8).



36. (*a*) Diseñe una fuente de corriente capaz de suministrar una corriente cd de 50 mA a una carga no especificada. Use un diodo 1N4733 ($V_{ruptura}$ = 5.1 V a 76 mA). (*b*) Use una simulación adecuada para determinar el rango permisible de resistencia de carga para su diseño.

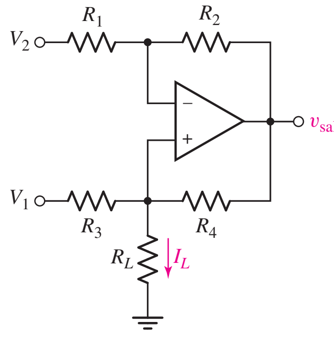


37. (*a*) Diseñe una fuente de corriente capaz de suministrar una cd de 10 mA a una carga no especificada. Use un diodo 1N4747 ($V_{ruptura} = 20$ V a 12.5 mA). (*b*) Use una simulación adecuada para determinar el rango permisible de resistencia de carga para su diseño.



38. El circuito representado en la figura 6.54 se conoce como fuente de corriente de Howland. Deduzca expresiones para v_{sal} e I_L, respectivamente, como función de V_1 y V_2.

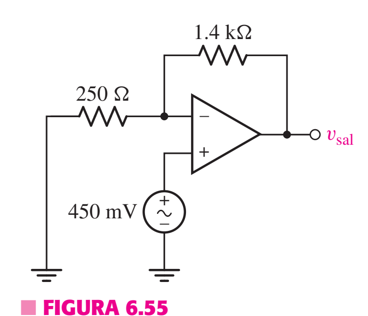
39. Para el circuito que se representa en la figura 6.54, que se conoce como una fuente de corriente de Howland, establezca $V_2 = 0$, $R_1 = R_3$ y $R_2 = R_4$; luego despeje la corriente I_L cuando $R_1 = 2R_2 = 1$ kΩ y $R_L = 100$ Ω.



■ **FIGURA 6.54**

6.5 Consideraciones prácticas

40. (*a*) Utilice los parámetros que aparecen en la tabla 6.3 para el amp op μA741 para analizar el circuito de la figura 6.55 y calcule un valor para v_{sal}. (*b*) Compare su resultado con lo que se predice usando el modelo ideal de amp op.



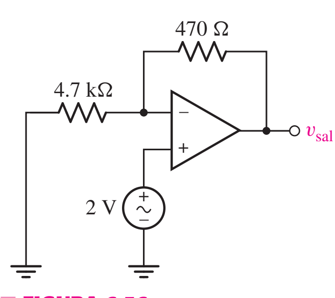
■ **FIGURA 6.55**

41. (*a*) Utilice los parámetros que aparecen en la tabla 6.3 para el amp op μA741 para analizar el circuito de la figura 6.10 si $R = 1.5$ kΩ, $v_1 = 2$ V y $v_2 = 5$ V. (*b*) Compare su solución con lo que se predice usando el modelo ideal de amp op.

42. Defina los siguientes términos, y explique cuándo y cómo cada uno de ellos puede impactar en el funcionamiento de un circuito con amp op: (*a*) relación de rechazo de modo común; (*b*) velocidad de decaimiento; (*c*) saturación; (*d*) retroalimentación.



43. Para el circuito de la figura 6.56, reemplace la resistencia de 470 Ω por un cortocircuito, y calcule v_{sal} usando (*a*) el modelo ideal del amp op; (*b*) los parámetros que aparecen en la tabla 6.3 para el amp op μA741; (*c*) una simulación PSpice adecuada. (*d*) Compare los valores obtenidos en los incisos (*a*) a (*c*) y comente sobre el posible origen de cualquier discrepancia.



■ **FIGURA 6.56**

44. Si el circuito de la figura 6.55 se analiza usando el modelo detallado de un amp op (en contraposición con el modelo ideal de amp op), calcule el valor de la ganancia en lazo abierto A necesario para obtener una ganancia de lazo cerrado dentro de 2% de su valor ideal.



45. Reemplace la fuente de 2 V en la figura 6.56 por una fuente de tensión sinusoidal que tenga una magnitud de 3 V y frecuencia angular $\omega = 2\pi f$. (*a*) ¿Cuál dispositivo, un amp op μA741 o un amp op LF411, seguirá mejor la frecuencia de la fuente dentro del rango 1 Hz $< f <$ 10 MHz? *Explique*. (*b*) Compare el desempeño en frecuencia del circuito dentro del rango 1 Hz $< f <$ 10 MHz, usando simulaciones adecuadas en PSpice, y compare los resultados con su predicción en el inciso (*a*).



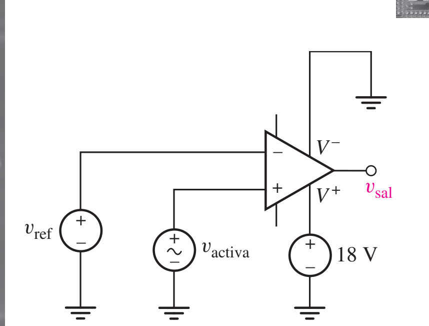
46. (*a*) Para el circuito de la figura 6.56, si el amp op (suponga LF411) es alimentado por fuentes iguales de 9 V, estime el valor máximo al que se puede aumentar la resistencia de 470 Ω antes de que sean perceptibles los efectos de la saturación. (*b*) Verifique su predicción mediante una simulación adecuada.

47. Para el circuito de la figura 6.55, calcule la tensión diferencial de entrada y la corriente de polarización de entrada si el amp op es (*a*) μA741; (*b*) LF411; (*c*) AD549K; (*d*) OPA690.

48. Calcule la ganancia en modo común para cada dispositivo listado en la tabla 6.3. Exprese su respuesta en unidades de V/V, no dB.

6.6 Comparadores y el amplificador de instrumentación

49. La piel humana, especialmente si está húmeda, es un conductor de electricidad razonablemente bueno. Si se supone una resistencia de menos de 10 MΩ para la punta del dedo oprimiendo entre dos terminales, diseñe un circuito que suministre una salida de +1 V si este interruptor no mecánico está "cerrado", y de −1 V si está "abierto".

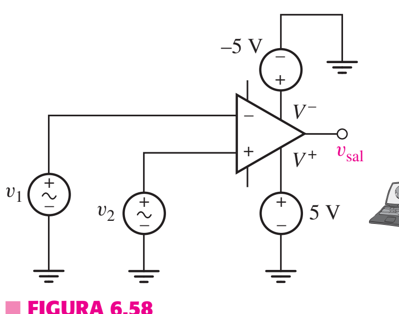


■ **FIGURA 6.57**

50. Diseñe un circuito que suministre una tensión de salida v_{sal} basado en el comportamiento de otra tensión v_{ent} de tal manera que

$$v_{sal} = \begin{cases} +2.5\text{ V} & v_{ent} > 1\text{ V} \\ 1.2\text{ V} & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

51. Suponga que, en el amplificador de instrumentación que se muestra en la figura 6.38*a*, los tres amp op son ideales. Determine el CMRR del circuito si (*a*) $R_1 = R_3$ y $R_2 = R_4$; (*b*) las cuatro resistencias tienen valores diferentes.

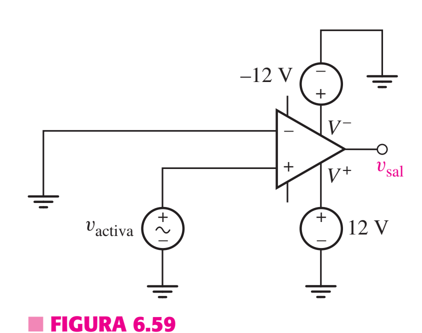


■ **FIGURA 6.58**

52. En el circuito que se muestra en la figura 6.57, dibuje la tensión de salida esperada v_{sal} en función de v_{activa} para $-5\text{ V} \leq v_{activa} \leq +5\text{ V}$, si v_{ref} es igual a (*a*) −3 V; (*b*) +3 V.

53. En el circuito que se muestra en la figura 6.58, (*a*) dibuje la tensión de salida esperada v_{sal} en función de v_1 para $-5\text{ V} \leq v_1 \leq +5\text{ V}$, si $v_2 = +2$ V; (*b*) grafique la tensión de salida esperada v_{sal} en función de v_2 para $-5\text{ V} \leq v_2 \leq +5\text{ V}$, si $v_1 = +2$ V.

54. En el circuito que se muestra en la figura 6.59, dibuje la tensión de salida esperada v_{sal} en función de v_{activa}, si $-2\text{ V} \leq v_{activa} \leq +2\text{ V}$. Verifique la solución mediante un μA741 (aunque es lento en comparación con los amp op diseñados específicamente para su uso como comparadores, su modelo en PSpice funciona bien, y puesto que ésta es una aplicación de cd, la velocidad no representa ningún problema). Elabore un esquema marcado adecuadamente con los resultados.



■ **FIGURA 6.59**



55. En aplicaciones de lógica digital, una señal de +5 V representa un estado lógico "1" y una señal de 0 V un estado lógico "0". Con el fin de procesar información en tiempo real mediante una computadora digital, se requiere de algún tipo de interfaz, la cual típicamente incluye un convertidor analógico-a-digital (A/D), esto es, un dispositivo que convierte las señales analógicas en digitales. Diseñe un circuito que actúe como un A/D de 1 bit, donde cualquier señal menor que 1.5 V represente un "0" lógico y cualquier señal mayor que 1.5 V un "1" lógico.

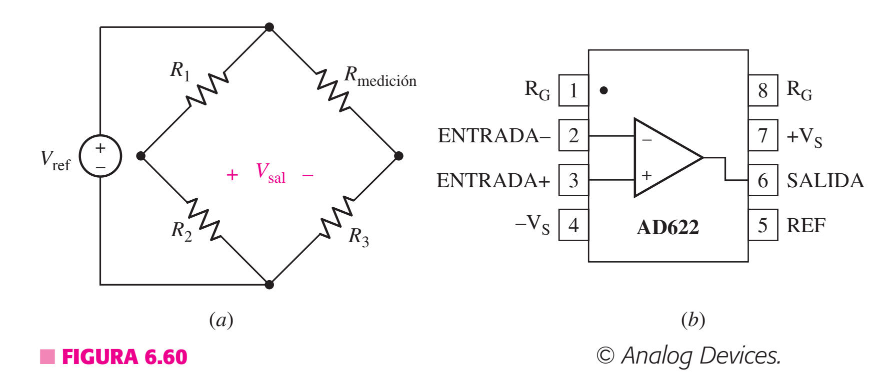


56. Una aplicación muy común de los amplificadores de instrumentación se realiza para medir tensiones en circuitos de medición de esfuerzo resistivo. Estos sensores de esfuerzo funcionan mediante la detección de los cambios en resistencia que resultan de las distorsiones geométricas, como se muestra en la ecuación [6] del capítulo 2. A menudo son parte de un circuito puente, como se muestra en la figura 6.60*a*, donde el medidor de esfuerzo se identifica como R_G. (*a*) Demuestre que $V_{sal} = V_{ent}\left[\frac{R_2}{R_1+R_2} - \frac{R_3}{R_3+R_{medición}}\right]$. (*b*) Verifique que $V_{sal} = 0$ cuando los valores de las tres resistencias R_1, R_2, y R_3 se seleccionan al mismo valor de la resistencia de medición $R_{medición}$. (*c*) En el caso de esta aplicación, el medidor que se selec-

cionó tiene una resistencia al esfuerzo de 5 kΩ y se espera un aumento máximo de resistencia de 50 mΩ. Sólo se tienen disponibles fuentes de ±12 V. Utilizando el amplificador de instrumentación de la figura 6.60*b* diseñe un circuito que proporcione una señal de tensión de +1V cuando el medidor de esfuerzo se encuentre en su carga máxima.

Especificaciones del AD622

La ganancia G del amplificador puede variar de 2 a 1 000 si se conecta una resistencia entre las terminales 1 y 8 con un valor determinado por $R = \frac{50.5}{G-1}$ kΩ.



■ **FIGURA 6.60** © *Analog Devices.*

Ejercicios de integración de capítulo



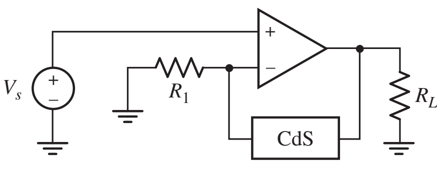
57. (*a*) Se le entrega a usted un interruptor electrónico que necesita 5 V a 1 mA para cerrarse; está abierto cuando no hay tensión en su entrada. Si el único micrófono disponible produce una tensión pico de 250 mV, diseñe un circuito que energice el interruptor cuando alguien hable en el micrófono. Observe que el nivel de audio de una voz genérica puede no corresponder a la tensión pico del micrófono. (*b*) Explique cualquier punto que pueda necesitar consideración si su circuito fuera a implementarse.



58. Usted ha formado una banda, a pesar de los consejos que ha recibido en contra. Realmente, la banda es bastante buena, salvo por el hecho de que el cantante principal (quien es el dueño de la batería, los micrófonos y el garaje donde practican) no tiene un muy buen oído musical. Diseñe un circuito que tome la salida de cada uno de los cinco micrófonos que usa su banda, y sume las tensiones para crear una sola señal de tensión que se alimente al amplificador. Pero no todas las tensiones deben amplificarse por igual. La salida de un micrófono se debe atenuar, de modo que su tensión pico sea 10% de la tensión pico de cualquier otro micrófono.



59. El sulfuro de cadmio (CdS) se usa comúnmente para fabricar resistencias cuyo valor depende de la intensidad de la luz que esté brillando en la superficie. En la figura 6.61 se usa una "fotocelda" de CdS como resistencia de retroalimentación R_f. En la oscuridad total, tiene una resistencia de 100 kΩ, y una resistencia de 10 kΩ bajo una intensidad de luz de 6 candelas. R_L representa un circuito que se activa cuando se aplica a sus terminales una tensión de 1.5 V o menor. Elija R_1 y V_S de modo que el circuito representado por R_L se active por una luz con una luminosidad de 2 candelas o mayor.



■ **FIGURA 6.61**



60. Una fuente que se encuentra fuera de cierto edificio de oficinas está diseñada para alcanzar una altura máxima de 5 metros a un caudal de 100 L/s. Una válvula de posición variable en línea con el suministro de agua a la fuente se puede controlar eléctricamente, de tal manera que la aplicación de 0 V da como resultado que la válvula esté totalmente abierta, y 5 V dan como resultado que la válvula esté cerrada. En condiciones de viento adversas, la altura máxima de la fuente debe ajustarse; si la velocidad del viento excede 50 km/h, la altura no puede exceder 2 metros. Hay disponible un sensor de velocidad de viento que suministra una tensión calibrada de tal manera que 1 V corresponde a una velocidad de 25 km/h. Diseñe un circuito que use el sensor de velocidad para controlar la fuente de acuerdo con las especificaciones.

61. Para el circuito de la figura 6.43, suponga que todos los valores de las resistencias sean iguales a 5 kΩ. Grafique v_{sal} como función del tiempo si (*a*) $v_1 = 5$ sen $5t$ V y $v_2 = 5$ cos $5t$ V; (*b*) $v_1 = 4\,e^{-t}$ V y $v_2 = 5\,e^{-2t}$ V; (*c*) $v_1 = 2$ V y $v_2 = e^{-t}$ V.

- ❑ Las combinaciones de capacitores en serie y en paralelo funcionan de manera *opuesta* a la de las resistencias. (Ejemplo 7.8)
- ❑ En razón de que los capacitores y los inductores son elementos lineales, la LVK, la LCK, la superposición, los teoremas de Thévenin y Norton, así como los análisis nodal y de malla, se aplican también en sus circuitos. (Ejemplo 7.9)
- ❑ Un capacitor como el elemento de retroalimentación de un amp op inversor origina una tensión de salida proporcional a la *integral* de la tensión de entrada. El intercambio de la resistencia de entrada y el capacitor de retroalimentación causa una tensión de salida proporcional a la *derivada* de la tensión de entrada. (Ejemplo 7.10)
- ❑ PSpice nos permite establecer la tensión inicial en un capacitor y la corriente inicial a través de un inductor. Un análisis transitorio proporciona detalles de la respuesta, en función del tiempo, de los circuitos que contienen estos tipos de elementos. (Ejemplo 7.11)

LECTURAS ADICIONALES

En los libros que se mencionan a continuación se puede encontrar una guía detallada de las características y selección de varios tipos de capacitores e inductores:

H. B. Drexler, *Passive Electronic Component Handbook,* 2a. ed., C. A. Harper, ed. Nueva York: McGrawHill, 2003, pp. 69-203.

C. J. Kaiser, *The Inductor Handbook,* 2a. ed. Olathe, Kans.: C. J. Publishing,1996.

Dos buenos libros que describen los circuitos amp op basados en capacitores son:

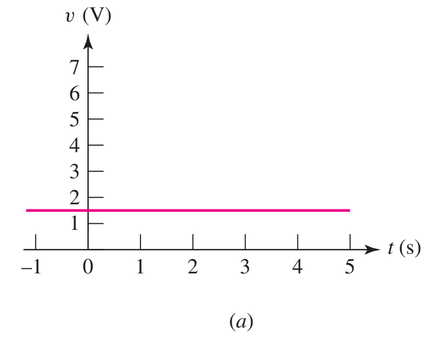
R. Mancini (ed), *Op Amps Are For Everyone,* 2a. ed. Amsterdam: Newnes, 2003.

W. G. Jung, *Op Amp Cookbook,* 3a. ed. Upper Saddle River, N. J.: Prentice Hall, 1997.

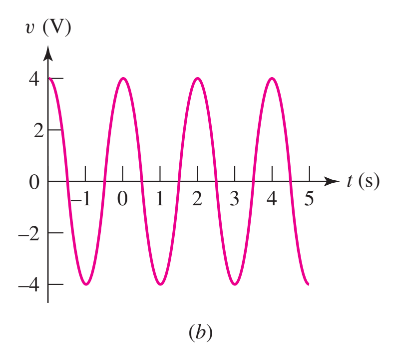
EJERCICIOS

7.1 El capacitor

1. Usando la convención pasiva de signos, determine la corriente que fluye a través de un capacitor de 220 nF para $t \geq 0$ si su tensión $v_C(t)$ dada por (*a*) -3.35 V; (*b*) $16.2e^{-9t}$ V; (*c*) 8 cos $0.01t$ mV; (*d*) $5 + 9$ sen $0.08t$ V.
2. Grafique la corriente que fluye por un capacitor de 13 pF para $t \geq 0$ como resultado de las formas de onda que se muestran en la figura 7.40. Siga la convención pasiva de signos.



(*a*)



(*b*)

■ **FIGURA 7.40**

3. (*a*) Si la forma de onda de tensión representada en la figura 7.41 se aplica entre las terminales de un capacitor electrolítico de 1 μF, grafique la corriente resultante, ajustándose a la convención pasiva de signos. (*b*) Repita el inciso (*a*) si el capacitor se reemplaza por un capacitor de 17.5 pF.

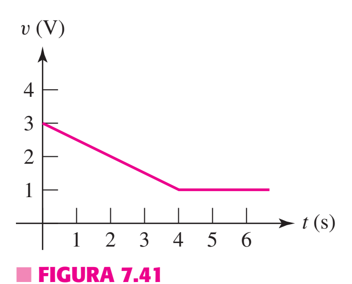
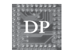


FIGURA 7.41

4. Se construye un capacitor de dos placas de cobre, cada una de las cuales mide 1 mm × 2.5 mm y 155 μm de espesor. Las dos placas se colocan frente a frente y están separadas por una brecha de 1 μm. Calcule la capacitancia resultante si (*a*) el dieléctrico intermedio tiene una permitividad de $1.35\varepsilon_0$; (*b*) el dieléctrico intermedio tiene una permitividad de $3.5\ \varepsilon_0$; (*c*) la separación de las placas se aumenta en 3.5 μm, y la brecha se llena de aire; (*d*) se duplica el área de las placas y la brecha de 1 μm se llena de aire.
5. Dos trozos de gadolinio, cada uno de los cuales mide 100 μm × 750 μm y 640 nm de espesor, se usan para construir un capacitor. Las dos placas se colocan frente a frente, y están separadas por una brecha de 100 nm. Calcule la capacitancia resultante si (*a*) el dieléctrico intermedio tiene una permitividad de $13.8\varepsilon_0$; (*b*) el dieléctrico intermedio tiene una permitividad de $500\varepsilon_0$; (*c*) se aumenta la separación entre las placas en 100 nm y la brecha se llena de aire; (*d*) se cuadruplica el área de las placas y se llena de aire la brecha de 100 nm.



6. Diseñe un capacitor de 100 nF construido con lámina de oro de 1 μm de espesor, y que quepa completo dentro de un volumen igual al de una batería estándar AAA, si el único dieléctrico disponible tiene una permitividad de $3.1\varepsilon_{0.}$



7. Diseñe un capacitor cuya capacitancia se pueda variar mecánicamente con un simple movimiento vertical, entre los valores de 100 pF y 300 pF.



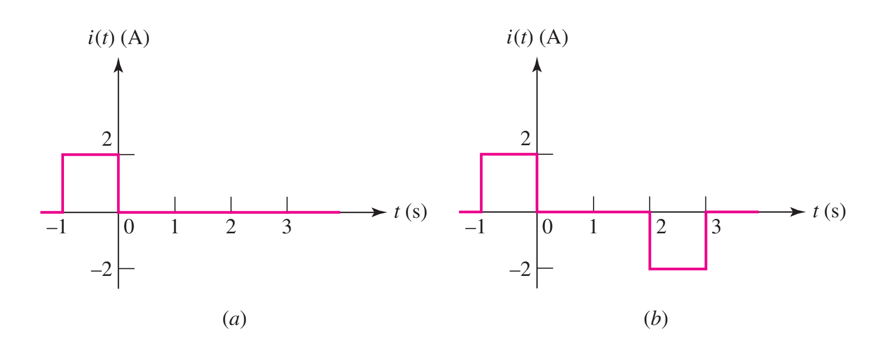
8. Diseñe un capacitor cuya capacitancia se pueda variar mecánicamente dentro del rango entre 50 nF y 100 nF haciendo girar 90° una perilla.
9. Un diodo de silicio de unión *pn* se caracteriza por una capacitancia de unión definida como

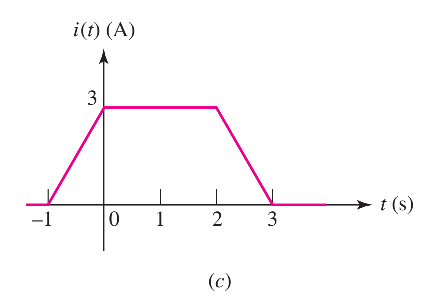
$$C_j = \frac{K_s \varepsilon_0 A}{W}$$

donde $K_s = 11.8$ del silicio, ε_0 es la permisividad del vacío, $A =$ el área de la sección transversal de la unión, y W se conoce como el ancho de agotamiento de la unión. W no sólo depende de la manera en que se fabrica el diodo, sino también de la tensión aplicada en sus dos terminales. Puede calcularse por medio de

$$W = \sqrt{\frac{2K_s\varepsilon_0}{qN}(V_{\mathrm{bi}} - V_A)}$$

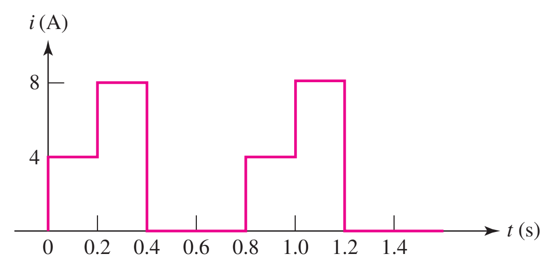
De tal forma, los diodos se emplean con frecuencia en circuitos electrónicos, puesto que se consideran como capacitores controlados por tensión. Suponiendo valores de parámetros de $N = 10^{18}\ \mathrm{cm}^{-3}$, $V_{\mathrm{bi}} = 0.57$ V, y empleando $q = 1.6 \times 10^{-19}$ C, calcule la capacitancia de un diodo con área de sección transversal $A = 1\ \mu\mathrm{m} \times 1\ \mu\mathrm{m}$ a tensiones aplicadas de $VA = -1, -5$ y -10 volts.
10. Siguiendo la convención pasiva de signos, dibuje la tensión que se presenta entre las terminales de un capacitor de 2.5 F en respuesta a las formas de onda de corriente que se muestran en la figura 7.42.





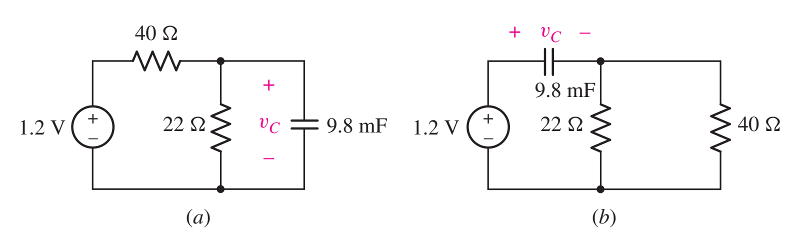
■ **FIGURA 7.42**

11. En la figura 7.43 se muestra la corriente que fluye a través de un capacitor de 33 mF. (*a*) Siguiendo la convención pasiva de signos, dibuje la forma de onda de la tensión resultante entre las terminales del dispositivo. (*b*) Calcule la tensión a 300 ms, 600 ms y 1.1 s.



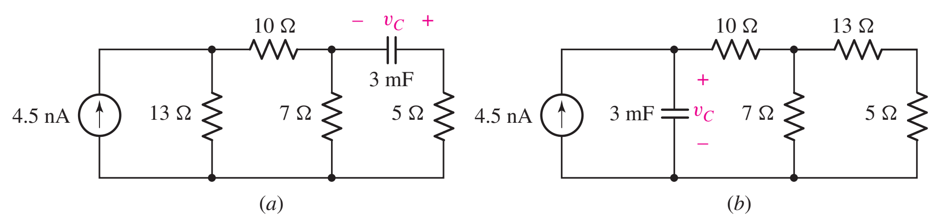
■ **FIGURA 7.43**

12. Calcule la energía almacenada en un capacitor en el tiempo $t = 1$ s, si (*a*) $C = 1.4$ F y $v_C = 8$V, $t > 0$; (*b*) $C = 23.5$ pF y $v_C = 0.8$ V, $t > 0$; (*c*) $C = 17$ nF, $v_C(1) = 12$ V, $v_C(0) = 2$ V y $\omega_C(0) = 295$ nJ.
13. Un capacitor de 137 pF está conectado a una fuente de tensión de tal manera que $v_C(t) = 12e^{-2t}$V, $t \geq 0$ y $v_C(t) = 12$ V, $t < 0$. Calcule la energía almacenada en el capacitor en t igual a (*a*) 0; (*b*) 200 ms; (*c*) 500 ms; (*d*) 1 s.
14. Calcule la potencia disipada en la resistencia de 40 Ω y la tensión marcada como v_C en cada uno de los circuitos representados en la figura 7.44.



■ **FIGURA 7.44**

15. Para cada uno de los circuitos que se muestran en la figura 7.45, calcule la tensión marcada como v_C.



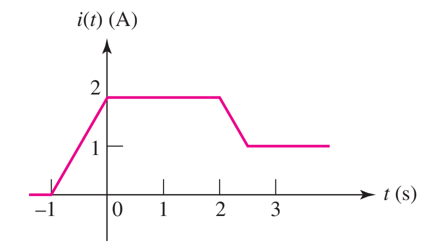
■ **FIGURA 7.45**

7.2 El inductor



16. Diseñe un inductor de 30 nH usando alambre macizo de cobre suave de calibre 29 AWG. Incluya un esquema de su diseño y marque los parámetros geométricos como sea necesario para la claridad. Suponga que la bobina tiene núcleo solo de aire.

17. Si la corriente que fluye a través de un inductor de 75 mH tiene la forma de onda que se muestra en la figura 7.46, (*a*) grafique la tensión que se presenta entre las terminales del inductor para $t \geq 0$, adoptando la convención pasiva de signos; y (*b*) calcule la tensión en $t = 1$ s, 2.9 s y 3.1 s.



■ **FIGURA 7.46**

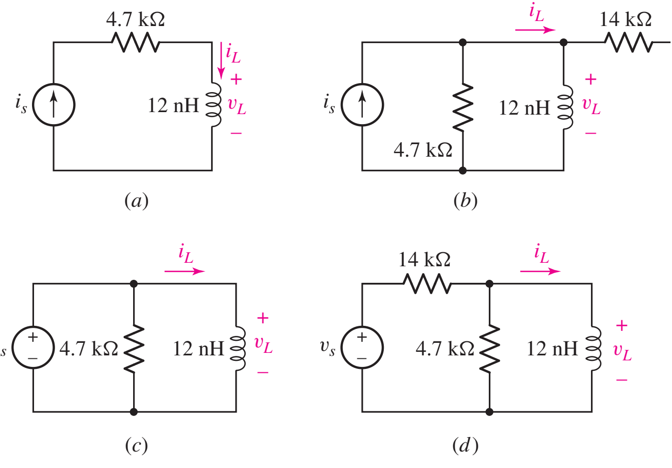
18. En la figura 7.47 se muestra la corriente a través de un inductor de aluminio de 17 nH. Dibuje la forma de tensión resultante para $t \geq 0$, siguiendo la convención pasiva de signos.

■ **FIGURA 7.47**

19. Determine la tensión para $t \geq 0$ que se presenta entre las terminales de un inductor de 4.2 mH, si la corriente (definida congruentemente con la convención pasiva de signos) es (*a*) -10 mA; (*b*) 3 sen $6t$ A; (*c*) $11 + 115\sqrt{2}\cos(100\pi t - 9^\circ)$ A; (*d*) $13e^{-t}$ nA; (*e*) $3 + te^{-14t}$ A.

20. Determine la tensión para $t \geq 0$ que se presenta entre las terminales de un inductor de 8 pH, si la corriente (definida congruentemente con la convención pasiva de signos) es (*a*) 8 mA: (*b*) 800 mA; (*c*) 8 A; (*d*) $4\,e^{-t}$ A; (*e*) $-3 + te^{-t}$ A.

21. Calcule v_L e i_L para cada uno de los circuitos representados en la figura 7.48, si $i_s = 1$ mA y $v_s = 2.1$ V.



■ **FIGURA 7.48**

22. La forma de onda de corriente que se muestra en la figura 7.14 tiene un tiempo de elevación de 0.1 s (100 ms) y un tiempo de caída de la misma duración. Si la corriente se aplica a la terminal de referencia de tensión "+" de un inductor de 200 nH, dibuje la forma de onda de tensión esperada si los tiempos de elevación y caída se cambian, respectivamente, a (*a*) 200 ms, 200 ms; (*b*) 10 ms, 50 ms; (*c*) 10 ns, 20 ns.

23. Determine la tensión del inductor que es el resultado de la forma de onda de corriente que se muestra en la figura 7.49 (adoptando la convención pasiva de signos) en t igual a (*a*) −1 s; (*b*) 0 s; (*c*) 1.5 s; (*d*) 2.5 s; (*e*) 4 s; (*f*) 5 s.

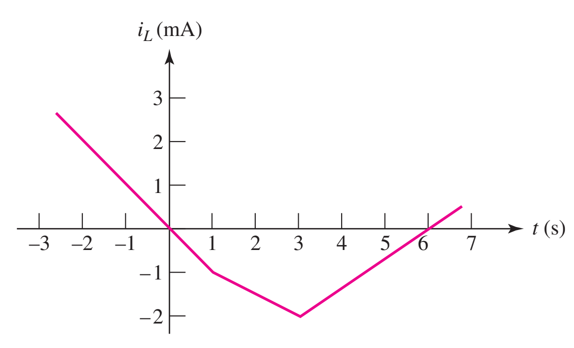


FIGURA 7.49

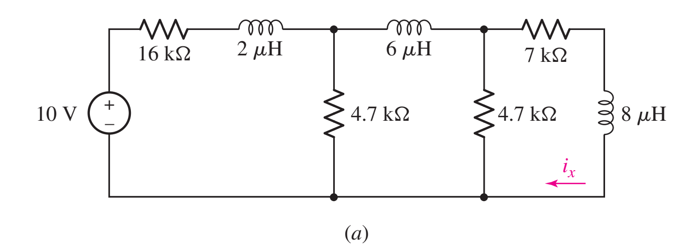
24. Determine la corriente que fluye a través de un inductor de 6 mH si la tensión (definida de tal manera que sea congruente con la convención pasiva de signos) está dada por (*a*) 5 V; (*b*) 100 sen $120\pi t$, $t \geq 0$ y 0, $t < 0$.

25. La tensión entre las terminales de un inductor de 2 H está dada por $v_L = 4.3t$, $0 \leq t \leq 50$ ms. Sabiendo que $i_L(-0.1) = 100\ \mu$A, calcule la corriente (suponiendo que está definida en forma congruente con la convención pasiva de signos) en t igual a (*a*) 0; (*b*) 1.5 ms; (*c*) 45 ms.

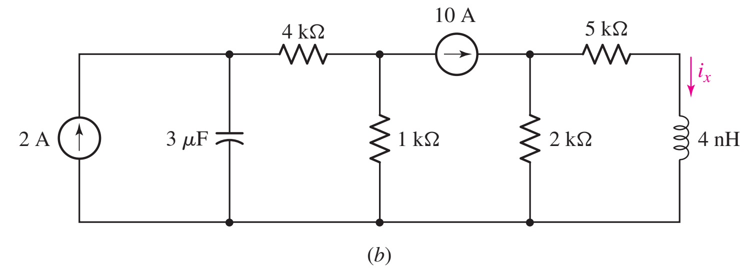
26. Calcule la energía almacenada en un inductor de 1 nH si la corriente que fluye a través de éste es (*a*) 0 mA; (*b*) 1 mA; (*c*) 20 A; (*d*) 5 sen $6t$ mA, $t > 0$.

27. Determine la cantidad de energía almacenada en un inductor de 33 mH en $t = 1$ ms, como resultado de una corriente i_L dada por (*a*) 7 A; (*b*) $3 - 9e^{-103t}$ mA.

28. Suponiendo que los circuitos de la figura 7.50 han estado conectados durante un tiempo muy largo, determine el valor de cada corriente marcada como i_x.



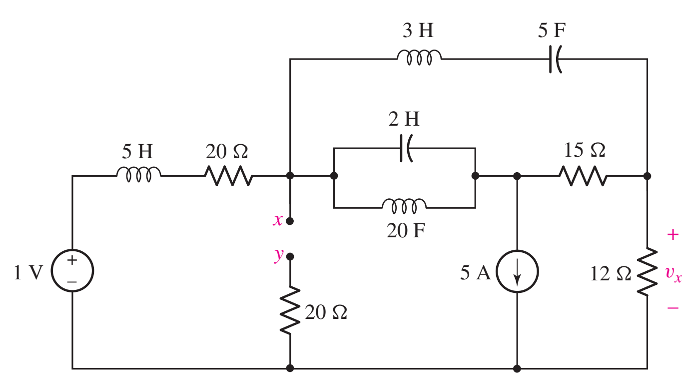
(*a*)



(*b*)

FIGURA 7.50

29. Calcule la tensión marcada como v_s en la figura 7.51, suponiendo que el circuito ha estado funcionando durante un tiempo muy largo, si (*a*) una resistencia de 10 Ω está conectada entre las terminales *x* y *y*; (*b*) un inductor de 1 H está conectado entre las terminales *x* y *y*; (*c*) un capacitor de 1 F está conectado entre terminales *x* y *y*; (*d*) un inductor de 4 H, en paralelo con una resistencia de 1 Ω, está conectado entre las terminales *x* y *y*.



■ **FIGURA 7.51**

10 kΩ
4 V
50 mH
47 kΩ

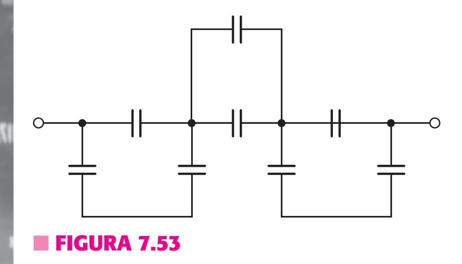
■ **FIGURA 7.52**

30. Para el circuito que se muestra en la figura 7.52, (*a*) calcule el equivalente de Thévenin desde la perspectiva del inductor; (*b*) determine la potencia que disipan las dos resistencias; (*c*) calcule la energía almacenada en el inductor.

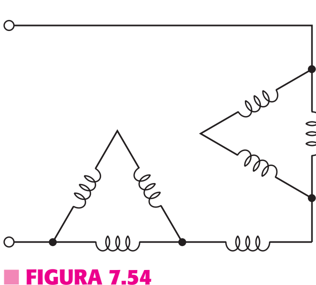
7.3 Combinaciones de inductancia y capacitancia

31. Si cada capacitor tiene un valor de 1 F, determine la capacitancia equivalente de la red que se muestra en la figura 7.53.

32. Determine la inductancia equivalente para la red que se muestra en la figura 7.54 si cada inductor tiene un valor *L*.



■ **FIGURA 7.53**

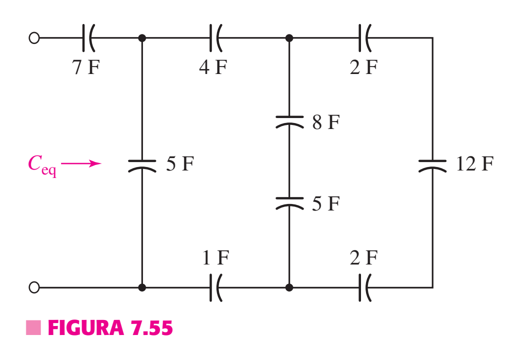


■ **FIGURA 7.54**



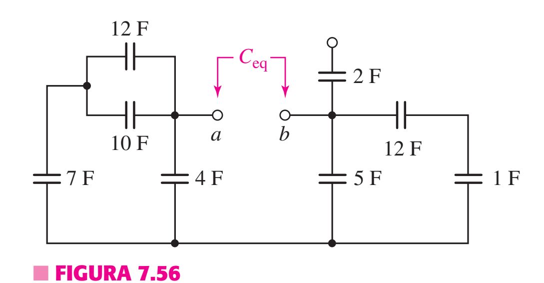
33. Usando tantos inductores de 1 nH como quiera, diseñe dos redes, de manera que cada una tenga una inductancia equivalente de 1.25 nH.

34. Calcule la capacitancia equivalente C_{eq} como está marcada en la figura 7.55.



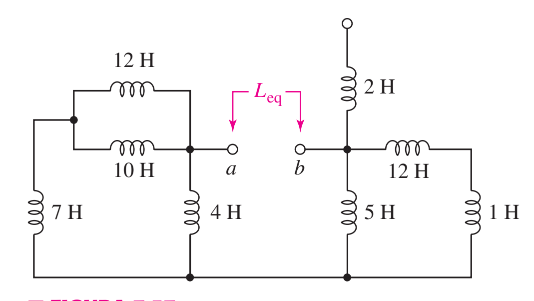
■ **FIGURA 7.55**

35. Determine la capacitancia equivalente C_{eq} de la red de la figura 7.56.



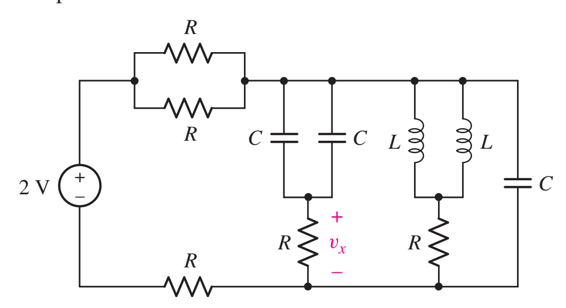
■ **FIGURA 7.56**

36. Aplique las técnicas combinatorias apropiadas para obtener un valor de inductancia L_{eq} marcada en la red de la figura 7.57.

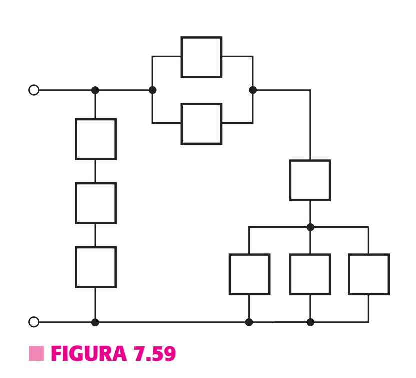


■ **FIGURA 7.57**

37. Reduzca el circuito representado en la figura 7.58 al número de componentes más pequeño posible.



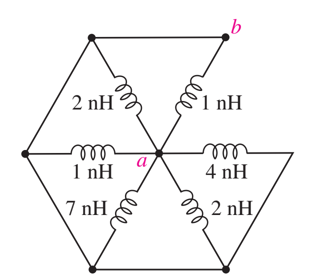
■ **FIGURA 7.58**



■ **FIGURA 7.59**

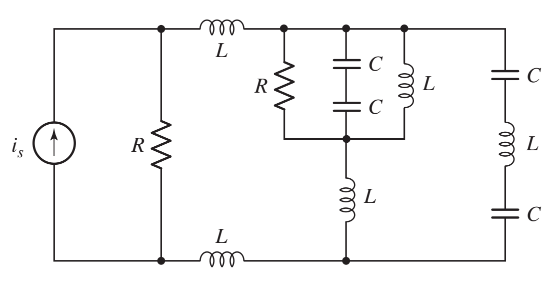
38. Observe la red de la figura 7.59 y calcule: (*a*) R_{eq} si cada elemento es una resistencia de 10 Ω; (*b*) L_{eq} si cada elemento es un inductor de 10 H: (*c*) C_{eq} si cada elemento es un capacitor de 10 F.

39. Determine la inductancia equivalente como se observa en las terminales marcadas como *a* y *b* en la red de la figura 7.60.



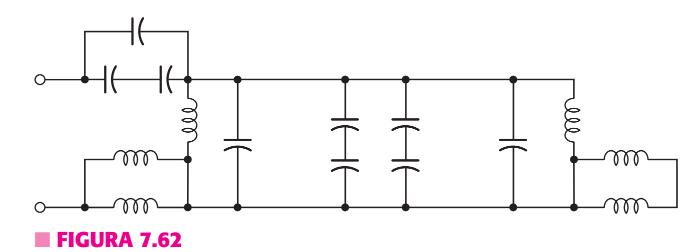
■ **FIGURA 7.60**

40. Reduzca el circuito representado en la figura 7.61 al número de componentes más pequeño posible.



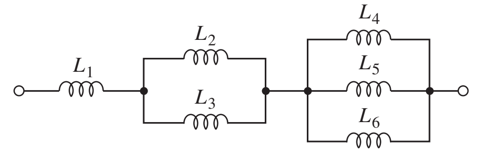
■ **FIGURA 7.61**

41. Reduzca la red de la figura 7.62 al menor número de componentes posible si cada inductor es de 1 nH y cada capacitor es de 1 mF.

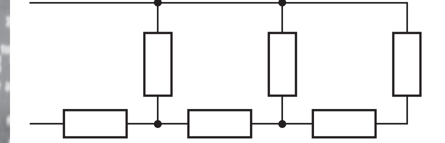


■ **FIGURA 7.62**

42. En la red de la figura 7.63, $L_1 = 1$ H, $L_2 = L_3 = 2$ H, $L_4 = L_5 = L_6 = 3$ H. (*a*) Calcule la inductancia equivalente. (*b*) Obtenga la expresión de una red general de este tipo que tenga *N* etapas, suponiendo que la etapa *N* está compuesta por *N* inductores, cada uno con una inductancia de *N* henrys.



■ **FIGURA 7.63**

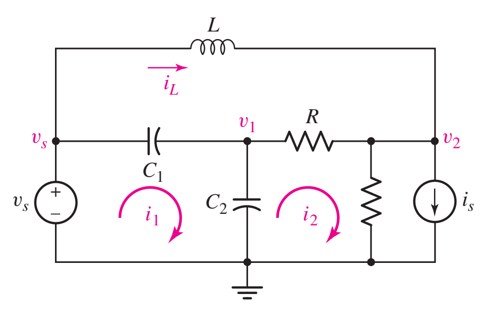


■ **FIGURA 7.64**

43. Simplifique la red de la figura 7.64, si cada elemento es un capacitor de 2 pF.
44. Simplifique la red de la figura 7.64, si cada elemento es un inductor de 1 nH.

7.4 Consecuencias de la linealidad

45. Con referencia al circuito representado en la figura 7.65, (*a*) escriba un sistema de ecuaciones nodales completo y (*b*) escriba un sistema de ecuaciones de malla completo.



■ **FIGURA 7.65**

46. (*a*) Escriba las ecuaciones nodales del circuito de la figura 7.66. (*b*) Escriba las ecuaciones de malla del mismo circuito.

47. En el circuito de la figura 7.67, sea $i_s = 60e^{-200t}$ mA con $i_1(0) = 20$ mA. (*a*) Proporcione $v(t)$ para cualquier t. (*b*) Determine $i_1(t)$ para $t \geq 0$. (c) Encuentre $i_2(t)$ para $t \geq 0$.

48. Sea $v_s = 100e^{-80t}$ V y $v_1(0) = 20$ V en el circuito de la figura 7.68, (*a*) calcule $i(t)$ para cualquier t; (*b*) determine $v_1(t)$ para $t \geq 0$; (*c*) proporcione $v_2(t)$ para $t \geq 0$.

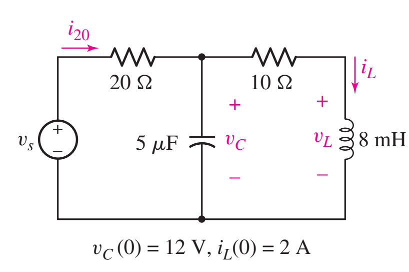


FIGURA 7.66

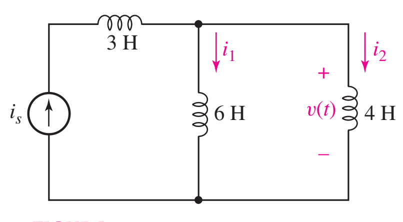


FIGURA 7.67

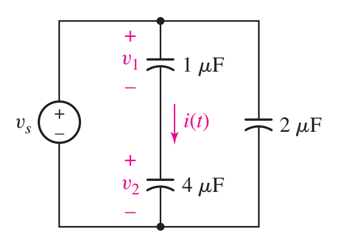


FIGURA 7.68

49. Si se supone que todas las fuentes del circuito de la figura 7.69 se conectaron y operaron durante mucho tiempo, aplique el principio de superposición para calcular $v_C(t)$ y $v_L(t)$.

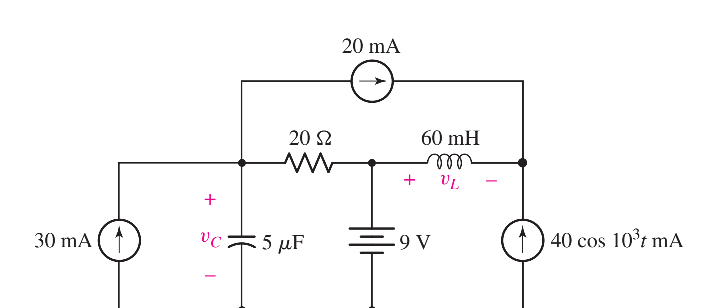


FIGURA 7.69

50. En el circuito de la figura 7.70, suponga que no hay energía almacenada en $t = 0$, y escriba un conjunto completo de ecuaciones nodales.

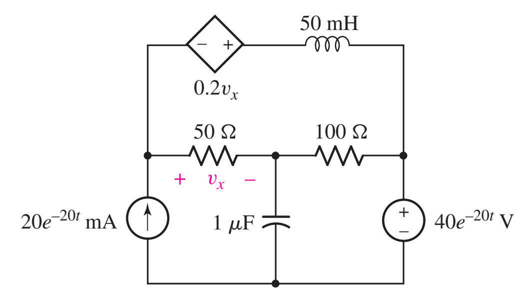
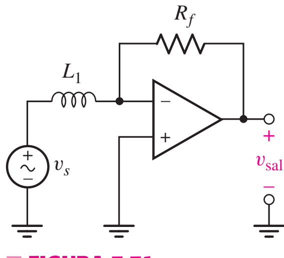


FIGURA 7.70

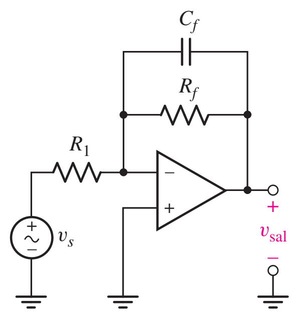
7.5 Circuitos de amp op simples con capacitores

51. Intercambie la ubicación de R_1 y C_f en el circuito de la figura 7.27, y suponga que $R_i = \infty$, $R_o = 0$ y $A = \infty$ para el amp op. (*a*) Determine $v_{sal}(t)$ como función de $v_s(t)$. (*b*) Obtenga una ecuación que relacione $v_O(t)$ y $v_s(t)$ si A no se supone infinita.

52. Para el circuito amplificador integrador de la figura 7.27, $R_1 = 100$ kΩ, $C_f = 500$ μF y $v_s = 20$ sen $540t$ mV. Calcule v_{salida} si (*a*) $A = \infty$, $R_i = \infty$ y $R_o = 0$; (*b*) $A = 5\,000$, $R_i = 1$ MΩ y $R_o = 3$ Ω.




■ FIGURA 7.71



■ FIGURA 7.72

53. Deduzca una expresión para v_{sal} en términos de v_s para el circuito amplificador que se muestra en la figura 7.71.

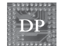
54. En la práctica, circuitos como los que se representan en la figura 7.27 pueden no funcionar correctamente a menos que haya una ruta de conducción entre las terminales de entrada y salida del amp op. (*a*) Analice el circuito modificado amplificador integrante que se muestra en la figura 7.72 para obtener una expresión para v_{sal} en términos de v_s, y (*b*) compare esta expresión con la ecuación [17].


55. Un nuevo equipo diseñado para hacer cristales de ingredientes fundidos está teniendo demasiadas fallas (productos resquebrajados). El gerente de producción desea monitorear la rapidez de enfriamiento para ver si está relacionada con el problema. El sistema tiene dos terminales de salida disponibles, en las que la tensión entre ellas es linealmente proporcional a la temperatura del crisol, de modo que 30 mV corresponde a 30°C y 1 V corresponde a 1 000°C. Diseñe un circuito cuya salida de tensión represente la rapidez de enfriamiento, calibrado de manera que 1 V y 1°C/s.


56. Una compañía de dulcería ha decidido aumentar la tasa de producción de sus barras de chocolate con leche para compensar un reciente aumento en el costo de las materias primas. Sin embargo, la unidad de envoltura no puede aceptar más de 1 barra por segundo, arriba de lo cual deja caer las barras. Hay disponible una señal de tensión sinusoidal de 200 mV pico a pico proveniente del sistema de fabricación de barras que alimenta a la unidad de envoltura, de modo que su frecuencia corresponde a la frecuencia de la producción de barras (es decir, 1 Hz = 1 barra/s). Diseñe un circuito que suministre una salida de tensión suficiente para energizar una alarma audible de 12 V cuando la tasa de producción exceda la capacidad de la unidad envolvedora.


57. Un problema al que se enfrentan los satélites es la exposición a partículas de alta energía, que pueden causar daño a los sensibles circuitos electrónicos, así como a las baterías solares que se usan para suministrar potencia. Un nuevo satélite de comunicación está provisto de un detector de protones de alta energía, que mide 1 cm × 1 cm. Proporciona una corriente directamente igual al número de protones que impactan la superficie por segundo. Diseñe un circuito cuya tensión de salida suministre el total acumulativo del número de impactos de protones, calibrado de tal manera que 1 V = 1 millón de impactos.

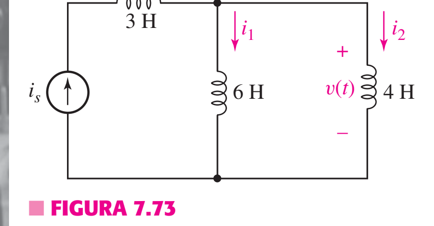

58. La salida de un sensor de velocidad conectado a una pieza sensible de un equipo móvil se calibra para dar una señal tal que 10 mV corresponda a movimiento lineal a 1 m/s. Si el equipo se sujeta a un choque súbito, puede dañarse. Como fuerza = masa × aceleración, se puede usar el monitoreo de la tasa de cambio de la velocidad para determinar si el equipo se transporta incorrectamente. (*a*) Diseñe un circuito que suministre una tensión proporcional a la aceleración lineal de modo que 10 mV = 1 m/s^2. (*b*) ¿Cuántas combinaciones sensor-circuito necesita esta aplicación?


59. Un sensor flotante en cierto tanque de combustible está conectado a una resistencia variable (que a menudo se llama potenciómetro), de modo que un tanque lleno (100 litros) corresponda a 1 Ω, y un tanque vacío corresponda a 10 Ω. (*a*) Diseñe un circuito que dé una tensión de salida que indique la cantidad de combustible que queda, de modo que 1 V = vacío y 5 V = lleno. (*b*) Diseñe un circuito que indique el caudal de consumo de combustible dando una salida de tensión calibrada para dar 1 V = 1 L/s.

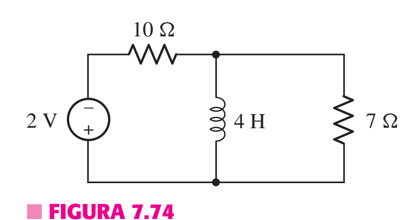
7.6 Dualidad

60. (*a*) Dibuje un dual exacto del circuito representado en la figura 7.73. (*b*) Marque las variables nuevas (duales). (*c*) Escriba ecuaciones nodales para ambos circuitos.

61. (*a*) Dibuje un dual exacto del circuito simple que se muestra en la figura 7.74. (*b*) Marque las variables nuevas (duales). (*c*) Escriba ecuaciones de malla para ambos circuitos.

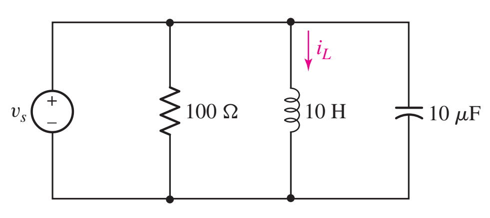


■ FIGURA 7.73



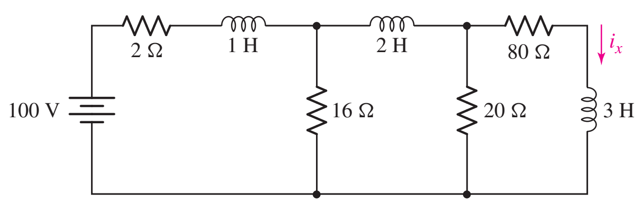
■ FIGURA 7.74

62. (*a*) Dibuje el circuito dual exacto del circuito simple que se muestra en la figura 7.75. (*b*) Marque las variables nuevas (duales). (*c*) Escriba las ecuaciones de malla para ambos circuitos.



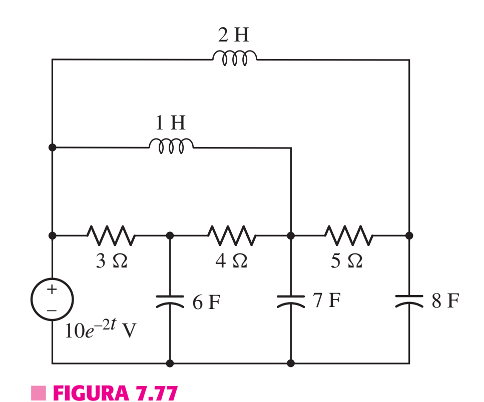
■ **FIGURA 7.75**

63. (*a*) Dibuje el circuito dual exacto del circuito simple que se muestra en la figura 7.76. (*b*) Marque las variables nuevas (duales). (*c*) Escriba las ecuaciones nodales y de malla para ambos circuitos.

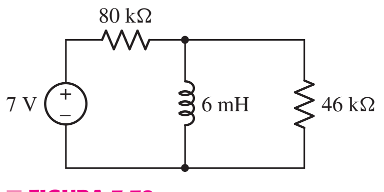


■ **FIGURA 7.76**

64. Dibuje el dual exacto del circuito de la figura 7.77. ¡Manténgalo limpio!



■ **FIGURA 7.77**

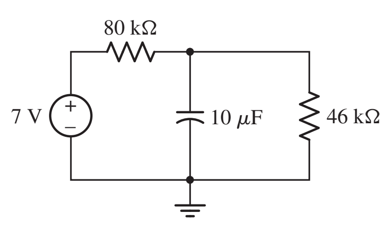



■ **FIGURA 7.78**

7.7 Construcción de modelos de capacitores e inductores con PSpice


65. Tomando el nodo inferior del circuito de la figura 7.78 como terminal de referencia, calcule (*a*) la corriente a través del inductor y (*b*) la potencia disipada por la resistencia de 7 Ω. (*c*) Verifique sus respuestas con la simulación PSpice adecuada.

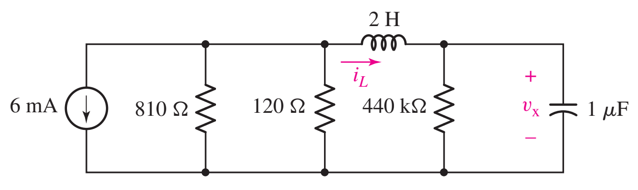

66. Para el circuito de cuatro elementos que se muestra en la figura 7.79, (*a*) calcule la potencia absorbida por cada resistencia; (*b*) determine la tensión a través del capacitor; (*c*) calcule la energía almacenada en el capacitor, y (*d*) verifique sus respuestas mediante la simulación PSpice adecuada. (Recuerde que los cálculos se pueden realizar en Probe.)



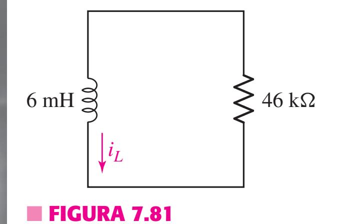
■ **FIGURA 7.79**



67. (*a*) Calcule i_L y v_x como se indican en el circuito de la figura 7.80. (*b*) Determine la energía almacenada en el inductor y el capacitor. (*c*) Verifique sus respuestas con la simulación PSpice adecuada.



■ **FIGURA 7.80**



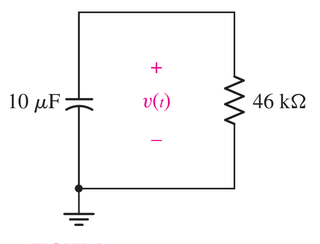
■ **FIGURA 7.81**



68. Para el circuito representado en la figura 7.81, el valor de i_L (0) = 1 mA. (*a*) Calcule la energía almacenada en el elemento en $t = 0$. (*b*) Realice una simulación del estado transitorio del circuito dentro del intervalo $0 \leq t \leq 500$ ns. Determine el valor de i_L en $t = 0$, 130 ns, 260 ns y 500 ns. (*c*) ¿Qué fracción de la energía inicial permanece en el inductor en $t = 130$ ns? ¿Y en $t = 500$ ns?



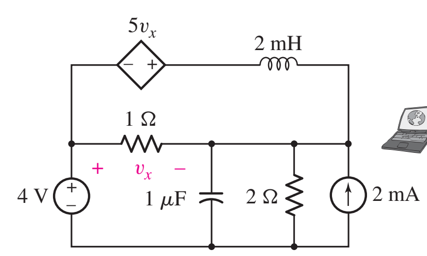
69. Suponga una tensión inicial de 9 V entre las terminales del capacitor de 10 μF que se muestra en la figura 7.82 (es decir, v (0) = 9 V). (*a*) Calcule la energía inicial almacenada en el capacitor. (*b*) Para $t > 0$, ¿usted espera que la energía permanezca en el capacitor? *Explique*. (*c*) Realice una simulación del estado transitorio del circuito dentro del intervalo $0 \leq t \leq 2.5$ s y determine $v(t)$ en $T = 460$ ms, 920 ms y 2.3 s. (*c*) ¿Qué fracción de la energía inicial permanece almacenada en el capacitor en $t = 460$ ms? ¿Y en $t = 2.3$ s?



■ **FIGURA 7.82**



70. Con referencia al circuito de la figura 7.83, (*a*) calcule la energía almacenada en cada elemento de almacenamiento de energía; (*b*) verifique sus respuestas mediante una simulación PSpice adecuada.



■ **FIGURA 7.83**

Ejercicios de integración de capítulo



71. Para el circuito de la figura 7.28, (*a*) dibuje v_{sal} dentro del intervalo $0 \leq t \leq 5$ ms si $R_f = 1$ kΩ, $C_1 = 100$ mF y v_s es una fuente sinusoidal de 1 kHz que tiene una tensión pico de 2 V. (*b*) Verifique su respuesta mediante una simulación del estado transitorio adecuada, graficando tanto v_s como v_{sal} en Probe. (*Pista*: entre los trazos de las gráficas añada un segundo eje *y* usando **Plot, Add Y Axis**. Esto permite ver claramente ambos trazos.)

72. (*a*) Grafique la función de salida v_{sal} del circuito amplificador de la figura 7.29 dentro del intervalo $0 \leq t \leq 100$ ms si v_s es una fuente sinusoidal de 60 Hz que tiene una tensión pico de 400 mV, R_1 es 1 kΩ y L_f es 80 nH. (*b*) Verifique su respuesta con una simulación del estado transitorio adecuada, graficando tanto v_s como v_{sal} en Probe. (*Pista:* Entre los trazos de las gráficas añada un segundo eje *y* usando **Plot, Add Y Axis**. Esto permite ver claramente ambos trazos.)



73. Para el circuito de la figura 7.71, (*a*) trace v_{sal} sobre el intervalo de $0 \leq t \leq 2.5$ ms si $R_f = 100$ kΩ, $L_1 = 100$ mH y v_s es una fuente sinusoidal que tiene una tensión pico de 5 V. (*b*) Verifique su respuesta con una simulación transitoria apropiada, trazando ambos v_s y v_{sal} en Probe. (*Pista*: entre los trazos de la gráfica añada un segundo eje *y* usando **Plot, Add Y Axis.** Esto permite ver claramente ambos trazos.)



74. Considere el integrador modificado representado en la figura 7.72. Considere $R_1 = 100$ Ω, $R_f = 10$ MΩ y $C_1 = 10$ mF. La fuente v_s proporciona una tensión sinusoidal de 10 Hz que tiene una amplitud pico de 0.5 V. (*a*) Grafique v_{sal} dentro del intervalo $0 \leq t \leq 500$ ms. (*b*) Verifique su respuesta mediante una simulación del estado transitorio adecuada graficando tanto v_s como v_{sal} en Probe. (*Pista*: entre los trazos de las gráficas añada un segundo eje *y* usando **Plot, Add Y Axis**. Esto permite ver claramente ambos trazos.)

Una descripción a detalle de los transitorios en circuitos eléctricos puede encontrarse en:

E. Weber, *Linear Transient Analysis Volume 1,* Wiley, Nueva York, 1954. (Fuera de publicación, sin embargo, se puede encontrar en las bibliotecas de muchas universidades.)

EJERCICIOS

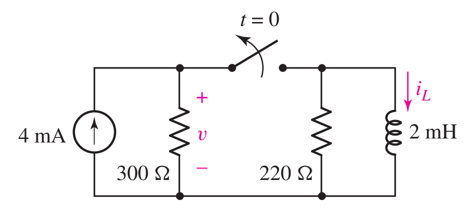
8.1 El circuito *RL* de fuente libre

1. Al establecer $R = 1\ \text{k}\Omega$ y $L = 1$ nH para el circuito representado en la figura 8.1 y con el conocimiento de que $i(0) = -3$ mA, (*a*) escriba una expresión para $i\ (t)$ válida para todo $t \geq 0$; (*b*) calcule $i(t)$ en $t = 0$, $t = 1$ ps, 2 ps y 5 ps, y (*c*) calcule la energía almacenada en el inductor en $t = 0$, $t = 1$ ps y $t = 5$ ps.
2. Si $i(0) = 1$ A y $R = 100\ \Omega$ para el circuito de la figura 8.1, (*a*) seleccione L de manera que $i(50\text{ ms}) = 368$ mA; (*b*) calcule la energía almacenada en el inductor en $t = 0$, 50 ms, 100 ms y 150 ms.
3. Con referencia al circuito que se muestra en la figura 8.1, seleccione valores para ambos elementos de manera que $L/R = 1$ y (*a*) calcule $v_R(t)$ en $t = 0$, 1, 2, 3, 4 y 5 s; (*b*) calcule la potencia disipada en la resistencia en $t = 0$, 1s y 5 s. (*c*) En $t = 5$ s, ¿cuál es el porcentaje de la energía inicial que está todavía almacenada en el inductor?
4. El circuito representado en la figura 8.1 se construye con componentes cuyos valores se desconocen. Si inicialmente fluye una corriente $i(0)$ de 6 μA a través del inductor y se determina que $i(1\text{ ms}) = 2.207\ \mu$A, calcule la relación de R a L.
5. Determine la ecuación característica de cada una de las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$(a)\ 5v + 14\frac{dv}{dt} = 0; \quad (b)\ -9\frac{di}{dt} - 18i = 0;$$

$$(c)\ \frac{di}{dt} + 18i + \frac{R}{B}i = 0; \quad (d)\ \frac{d^2 f}{dt^2} + 8\frac{df}{dt} + 2f = 0.$$

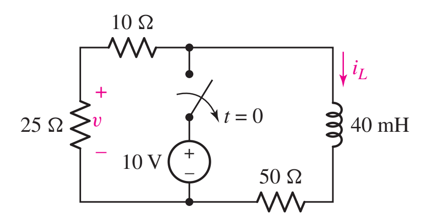
6. Para las siguientes ecuaciones características, escriba las ecuaciones diferenciales correspondientes y encuentre todas las raíces, ya sean reales, imaginarias o complejas: (*a*) $4s + 9 = 0$; (*b*) $2s - 4 = 0$; (*c*) $s^2 + 7s + 1 = 0$; (*d*) $5s^2 + 8s + 18 = 0$.
7. Con la suposición de que el interruptor en el circuito de la figura 8.54 ha estado cerrado durante un largo tiempo, calcule $i_L(t)$ en (*a*) el instante inmediatamente anterior a la apertura del interruptor; (*b*) el instante inmediatamente posterior a la apertura del interruptor; (*c*) $t = 15.8\ \mu$s; (*d*) $t = 31.5\ \mu$s; (*e*) $t = 78.8\ \mu$s.



■ **FIGURA 8.54**

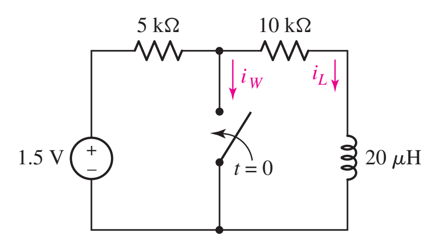
8. El interruptor en la figura 8.54 ha estado cerrado desde que Catfish Hunter lanzó por última vez para los Yanquis de Nueva York. Calcule la tensión marcada v, así como la energía almacenada en el inductor en (*a*) el instante inmediatamente anterior al momento en que el interruptor se abrió; (*b*) el instante inmediatamente posterior al momento en que se abrió el interruptor; (*c*) $t = 8\ \mu$s, (*d*) $t = 80\ \mu$s.
9. El interruptor del circuito en la figura 8.55 ha estado cerrado durante un tiempo ridículamente largo hasta abrirse de manera repentina en $t = 0$. (*a*) Obtenga expresiones para i_L y v en el circuito de la figura 8.55 que sean válidas para todo $t \geq 0$. (*b*) Calcule $i_L(t)$ y $v(t)$ en

el instante inmediatamente anterior a la apertura del interruptor, en el instante inmediatamente posterior a la apertura del interruptor, y en el $t = 470\ \mu$s.



■ **FIGURA 8.55**

10. Suponiendo que el interruptor ha estado inicialmente abierto por un tiempo realmente muy largo, (*a*) obtenga una expresión para i_W en el circuito de la figura 8.56 que sea válida para todo $t \geq 0$; (*b*) calcule i_W en $t = 0$ y $t = 1.3$ ns.



■ **FIGURA 8.56**

8.2 Propiedades de la respuesta exponencial

11. (*a*) Grafique la función $f(t) = 10\ e^{-2t}$ dentro del intervalo de $0 \leq t \leq 2.5$ s, usando escalas lineales tanto para el eje *y* como para el eje *x*. (*b*) Vuelva a graficar con una escala logarítmica para el eje *y*. [*Pista:* la función semilogy() puede ser de utilidad aquí.]. (*c*) ¿Cuáles son las unidades del 2 en el argumento de la exponencial? (*d*) ¿En qué tiempo alcanza la función un valor de 9? ¿Y de 8? ¿Y de 1?

12. La corriente $i(t)$ que fluye a través de una resistencia de 1 Ω está dada por $i(t) = 5e^{-10t}$ mA, $t \geq 0$. (*a*) Determine el valor de *t* para el cual la magnitud de la tensión de la resistencia es igual a 5 V, 2.5 V, 0.5 V y 5 mV. (*b*) Grafique la función dentro del intervalo $0 \leq t \leq 1$ s, usando escalas lineales para ambos ejes. (*c*) Trace una tangente a su curva en $t = 100$ ms y determine dónde interseca la tangente el eje de tiempo.

13. El espesor de una celda solar se debe elegir cuidadosamente para asegurar que se absorban de manera adecuada los fotones; incluso los metales se pueden hacer parcialmente transparentes al laminarse en hojas muy delgadas. Si el flujo luminoso incidente (número de fotones por unidad de área por unidad de tiempo) en la superficie de la celda solar ($x = 0$) está dado por Φ_0, y la intensidad de la luz a la distancia *x* dentro de la celda solar está dada por $\Phi(x)$, el comportamiento de $\Phi(x)$ está descrito por la ecuación $d\Phi/dx + \alpha\Phi = 0$. Aquí, α, conocido como el coeficiente de absorción, es una constante específica para un material semiconductor dado. (*a*) ¿Cuál es la unidad SI para α?; (*b*) Obtenga una expresión para $\Phi(x)$ en términos de Φ_0, α y *x*. (*c*) ¿De qué espesor debe construirse la celda solar para que absorba al menos 38% de la luz incidente? Exprese su respuesta en términos de α. (*d*) ¿Qué sucede a la luz que entra a la celda solar en $x = 0$ pero no se absorbe?

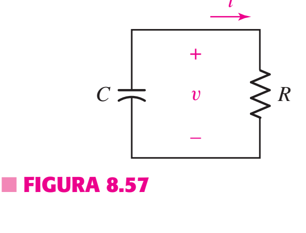


14. Para el circuito de la figura 8.5, calcule la constante de tiempo si la resistencia de 10 Ω se reemplaza por (*a*) un cortocircuito; (*b*) una resistencia de 1 Ω; (*c*) una conexión en serie de dos resistencias de 5 Ω; (*d*) una resistencia de 100 Ω. (*e*) Verifique sus respuestas con una simulación adecuada de barrido de parámetros. (*Pista:* La herramienta de cursor puede ser conveniente, y la respuesta no depende de la corriente inicial que usted elija para el inductor.)



15. Diseñe un circuito que produzca una tensión de 1 V en algún tiempo inicial, y una tensión de 368 mV en un tiempo 5 s después. Usted puede especificar una corriente inicial del inductor sin mostrar cómo surge.

8.3 El circuito *RC* de fuente libre



■ **FIGURA 8.57**

16. La resistencia en el circuito de la figura 8.57 se ha incluido para modelar la capa dieléctrica que separa las placas del capacitor de 3.1 nF y tiene un valor de 55 MΩ. El capacitor está almacenando 200 mJ de energía inmediatamente antes de $t = 0$. (*a*) Escriba una expresión para $v(t)$ válida para $t \geq 0$. (*b*) Calcule la energía que queda en el capacitor en $t = 170$ ms. (*c*) Grafique $v(t)$ en el intervalo de $0 < t < 850$ ms, e identifique el valor de $v(t)$ cuando $t = 2\tau$.

17. La resistencia en el circuito de la figura 8.57 tiene un valor de 1 Ω y está conectada a un capacitor de 22 mF. El dieléctrico del capacitor tiene resistencia infinita, y el dispositivo está almacenando 891 mJ de energía inmediatamente antes de $t = 0$. (*a*) Escriba una expresión para $v(t)$ válida para $t \geq 0$. (*b*) Calcule la energía que queda en el capacitor en $t = 11$ ms y 33 ms. (*c*) Si se determina que el dieléctrico del capacitor tiene mucho más fugas que las esperadas y tiene una resistencia tan baja como 100 kΩ, repita los incisos (*a*) y (*b*).

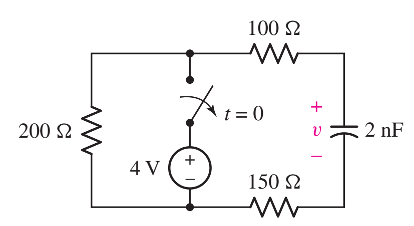


18. Calcule la constante de tiempo del circuito representado en la figura 8.57 si $C = 10$ mF y R es igual a (*a*) 1 Ω; (*b*) 10 Ω; (*c*) 100 Ω. (*d*) Verifique sus respuestas con una simulación adecuada de barrido de parámetros. (*Pista:* La herramienta de cursor puede resultar útil, y la constante de tiempo no depende de la tensión inicial entre las terminales del capacitor.)



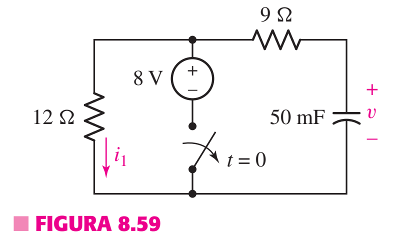
19. Diseñe un circuito basado en capacitores que proporcione (*a*) una tensión de 9 V en algún tiempo $t = 0$, y una tensión de 1.2 V en un tiempo 4 ms después. (*b*) Una corriente de 1 mA en algún tiempo $t = 0$, y una corriente reducida de 50 μA en un tiempo 100 ns después. (Usted puede elegir diseñar dos circuitos separados si así lo desea, y no necesita mostrar cómo se establece la tensión inicial del capacitor.)

20. Es seguro suponer que un interruptor dibujado en el circuito de la figura 8.58 ha estado cerrado durante un tiempo tan largo que cualquier transitorio que podría haber surgido desde la primera vez que se conectó la fuente de tensión ha desaparecido. (*a*) Determine la constante de tiempo del circuito. (*b*) Calcule la tensión $v(t)$ en $t = \tau$, 2τ y 5τ.



■ **FIGURA 8.58**

21. Podemos suponer con seguridad que el interruptor del circuito de la figura 8.59 estuvo cerrado durante un tiempo muy largo antes de abrirse en $t = 0$. (*a*) Determine la constante de tiempo del circuito. (*b*) Obtenga una expresión para $i_1(t)$ que sea válida para $t > 0$. (*c*) Determine la potencia disipada por la resistencia de 12 Ω en $t = 500$ ms.



■ **FIGURA 8.59**

22. El interruptor arriba de la fuente de 12 V en el circuito de la figura 8.60 ha estado cerrado desde inmediatamente después de que se inventó la rueda. Finalmente se abre en $t = 0$. (*a*) Calcule la constante de tiempo del circuito. (*b*) Obtenga una expresión para $v(t)$ válida para $t > 0$. (*c*) Calcule la energía almacenada en el capacitor 170 ms después de haber abierto el interruptor.

■ **FIGURA 8.60**

23. Para el circuito representado esquemáticamente en la figura 8.61, (*a*) calcule $v(t)$ en $t = 0$, $t = 984$ s y $t = 1\ 236$ s; (*b*) determine la energía que todavía está almacenada en el capacitor en $t = 100$ s.

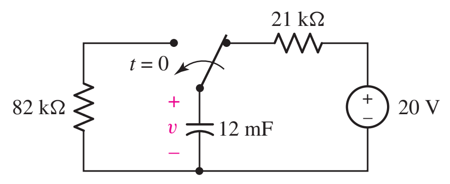


FIGURA 8.61

24. Para el circuito representado en la figura 8.62, (*a*) calcule la constante de tiempo del circuito; (*b*) determine v en el instante inmediatamente antes de cerrar el interruptor; (*c*) obtenga una expresión para $v(t)$ válida para $t > 0$; (*d*) calcule $v(3\text{ ms})$.

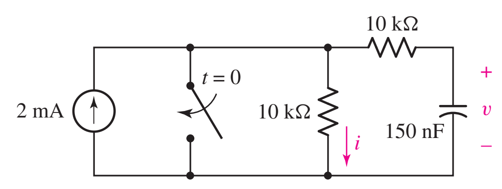


FIGURA 8.62

25. El interruptor dibujado en la figura 8.62 ha estado abierto durante un tiempo larguísimo. (*a*) Determine el valor de la corriente etiquetada i inmediatamente antes de cerrar el interruptor. (*b*) Obtenga el valor de i inmediatamente después de cerrar el interruptor. (*c*) Calcule la potencia disipada en cada resistencia dentro del intervalo $0 < t < 15$ ms. (*d*) Grafique su respuesta del inciso (*c*).

8.4 Una perspectiva más general:

26. (*a*) Obtenga una expresión para $v(t)$, la tensión que aparece entre las terminales de la resistencia R_3 en el circuito de la figura 8.63 que sea válida para $t > 0$. (*b*) Si $R_1 = 2R_2 = 3R_3 = 4R_4 = 1.2$ kΩ, $L = 1$ mH e $i_L(0^-) = 3$ mA, calcule $v(t = 500\text{ ns})$.

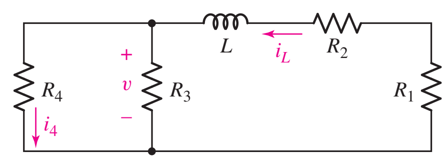


FIGURA 8.63

27. Para el circuito de la figura 8.64 determine i_x, i_L y v_L en t igual a (*a*) 0^-; (*b*) 0^+.

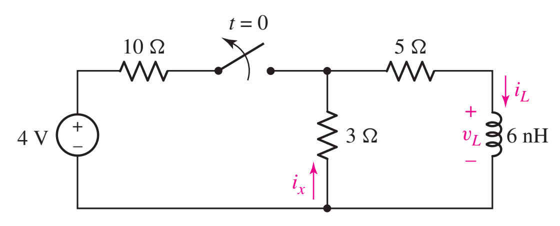
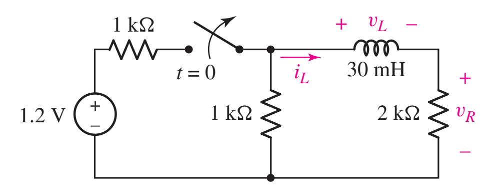


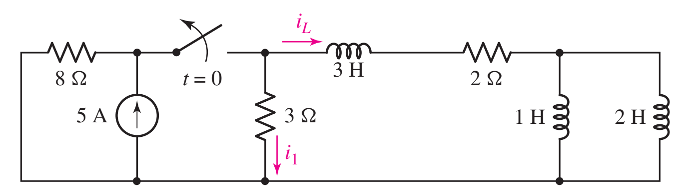
FIGURA 8.64

28. El interruptor que se muestra en la figura 8.65 ha estado cerrado durante 6 años antes de abrirse en $t = 0$. Determine i_L, v_L y v_R en t igual a (*a*) 0^-; (*b*) 0^+; (*c*) 1 μs; (*d*) 10 μs.



■ **FIGURA 8.65**

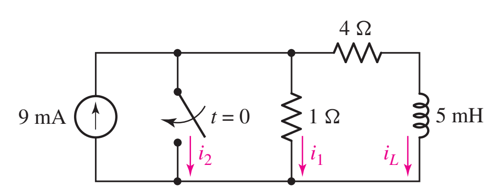
29. Obtenga expresiones tanto para $i_1(t)$ como para $i_L(t)$ como están marcados en la figura 8.66 y que sean válidas para $t > 0$.



■ **FIGURA 8.66**

30. La tensión entre las terminales de la resistencia en un circuito *RL* simple libre de fuentes está dado por $5e^{-90t}$ V, $t > 0$. El valor del inductor no se conoce. (*a*) ¿En qué tiempo será la tensión del inductor exactamente la mitad de su valor máximo? (*b*) ¿En qué tiempo alcanzará la corriente del inductor 10% de su valor máximo?

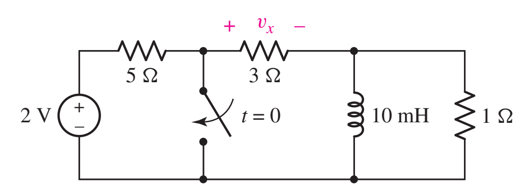
31. Con referencia a la figura 8.67, calcule las corrientes i_1 e i_2 en t igual a (*a*) 1 ms; (*b*) 3 ms.



■ **FIGURA 8.67**



32. (*a*) Obtenga una expresión para v_x marcado en el circuito de la figura 8.68. (*b*) Calcule v_x en $t = 5$ ms. (*c*) Verifique su respuesta mediante una simulación PSpice adecuada. (*Pista:* Use el componente llamado **Sw_tClose**.)



■ **FIGURA 8.68**

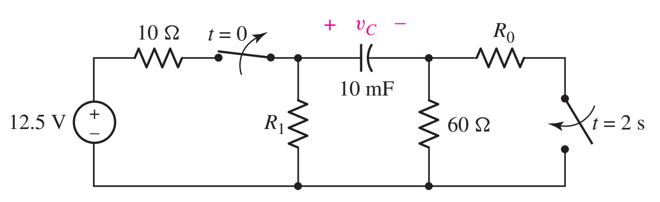


33. Diseñe un circuito completo que produzca una tensión v_{ab} entre dos terminales marcadas *a* y *b*, respectivamente, de tal manera que $v_{ab} = 5$ V en $t = 0^-$, 2 V en $t = 1$ s y menos de 60 mV en $t = 5$. Verifique la operación de su circuito usando una simulación PSpice adecuada. (*Pista:* utilice el componente llamado **Sw_tOpen** o **Sw_tClose**, según sea adecuado.)

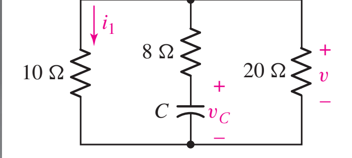


34. Para el componente **Sw_tOpen**, PSpice emplea realmente una secuencia de simulaciones en las que el componente se reemplaza primero por una resistencia de valor 1 MΩ, y luego por una resistencia de 10 mΩ, correspondiente al momento en que se abre el interruptor. (*a*) Evalúe la confiabilidad de estos valores predeterminados mediante la simulación del circuito de la figura 8.55 y la evaluación de i_L en $t = 1$ ns. (*b*) Repita el inciso (*a*) cambiando **RCLOSED** a 1 Ω. ¿Esto cambió su respuesta? (*c*) Repita el inciso (*a*) cambiando **ROPEN** a 100 kΩ y **RCLOSED** reajustado a su valor predeterminado. ¿Esto cambió su respuesta? (*Pista*: haga doble clic en la parte para acceder a sus atributos.)

35. Seleccione valores para las resistencias R_0 y R_1 en el circuito de la figura 8.69 de manera que $v_C(0.65) = 5.22$ V y $v_C(2.21) = 1$ V.



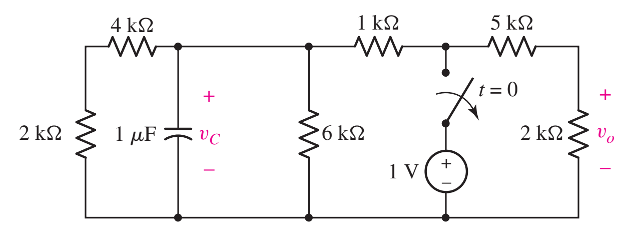
■ **FIGURA 8.69**



■ **FIGURA 8.70**

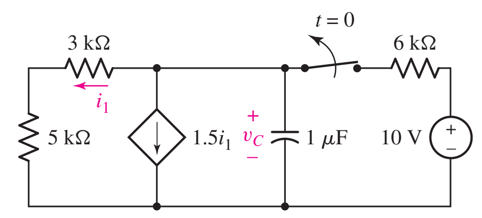
36. Una medición rápida determina que la tensión del capacitor v_C en el circuito de la figura 8.70 es 2.5 V en $t = 0^-$. (*a*) Determine $v_C\,(0^+)$, $i_1\,(0^+)$ y $v(0^+)$. (*b*) Seleccione un valor de *C* tal que la constante de tiempo del circuito sea igual a 14 s.

37. Determine $v_C(t)$ y $v_o(t)$ como está marcado en el circuito representado en la figura 8.71 para *t* igual a (*a*) 0^-; (*b*) 0^+; (*c*) 10 ms; (*d*) 12 ms.

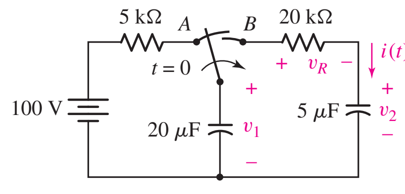


■ **FIGURA 8.71**

38. Para el circuito que se muestra en la figura 8.72, determine (*a*) $v_C(0^-)$; (*b*) $v_C(0^+)$; (*c*) la constante de tiempo del circuito; (*d*) $v_C(3\text{ ms})$.



■ **FIGURA 8.72**



■ **FIGURA 8.73**

39. El interruptor de la figura 8.73 se mueve de *A* a *B* en $t = 0$ después de estar en *A* por mucho tiempo. Esto coloca a los dos capacitores en serie, lo cual permite que en los capacitores queden atrapadas tensiones de cd iguales y opuestas. (*a*) Determine $v_1(0^-)$, $v_2(0^-)$ y $v_R(0^-)$. (*b*) Calcule $v_1\,(0^+)$, $v_2\,(0^+)$, y $v_R(0^+)$. (*c*) Obtenga la constante de tiempo de $v_R(t)$. (*d*) Proporcione $v_R(t)$, $t > 0$, (*e*). Determine $i(t)$, (*f*). Encuentre $v_1(t)$ y $v_2(t)$ a partir de $i(t)$ y los valores iniciales. (*g*) Demuestre que la energía almacenada en $t = \infty$ más la energía total disipada en la resitencia de 20 kΩ es igual a la energía almacenada en los capacitores en $t = 0$.

40. El inductor de la figura 8.74 está almacenando 54 nJ en $t = 0^-$. Calcule la energía que queda en t igual a (*a*) 0^+; (*b*) 1 ms; (*c*) 5 ms.

■ **FIGURA 8.74**

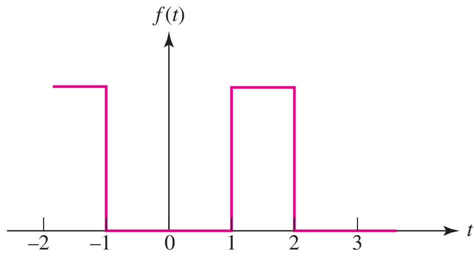
8.5 La función escalón unitario

41. Calcule las siguientes funciones en $t = -2$, 0 y +2: (*a*) $f(t) = 3u(t)$; (*b*) $g(t) = 5u(-t) + 3$; (*c*) $h(t) = 5u(t - 3)$; (*d*) $z(t) = 7u(1 - t) + 4u(t + 3)$.

42. Calcule las siguientes funciones en $t = -1$, 0 y +3: (*a*) $f(t) = tu(1 - t)$; (*b*) $g(t) = 8 + 2u(2 - t)$; (*c*) $h(t) = u(t + 1) - u(t - 1) + u(t + 2) - u(t - 4)$; (*d*) $z(t) = 1 + u(3 - t) + u(t - 2)$.

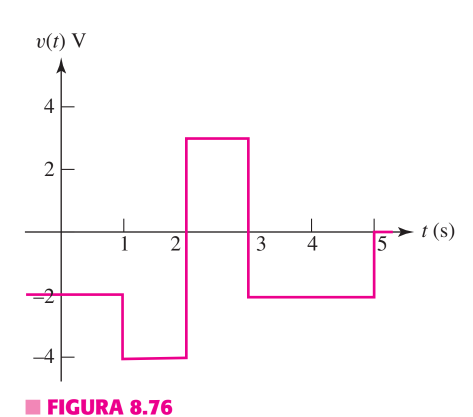
43. Dibuje las siguientes funciones dentro del intervalo $-3 \leq t \leq 3$; (*a*) $v(t) = 3 - u(2 - t) - 2u(t)$ V; (*b*) $i(t) = u(t) - u(t - 0.5) + u(t - 1) - u(t - 1.5) + u(t - 2) - u(t - 2.5)$ A; (*c*) $q(t) = 8u(-t)$ C.

44. Use funciones escalón para construir una ecuación que describa la forma de onda esquematizada en la figura 8.75.



■ **FIGURA 8.75**

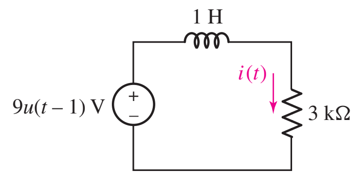
45. Usando funciones escalón según sea adecuado, describa la forma de onda de tensión graficada en la figura 8.76.



■ **FIGURA 8.76**

8.6 Accionamiento de circuitos *RL*

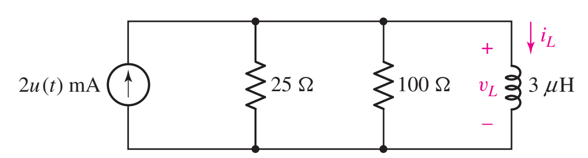
46. Con referencia al circuito simple representado en la figura 8.77, calcule $i(t)$ para (*a*) $t = 0^-$; (*b*) $t = 0^+$; (*c*) $t = 1^-$; (*d*) $t = 1^+$; (*e*) $t = 2$ ms.



■ **FIGURA 8.77**

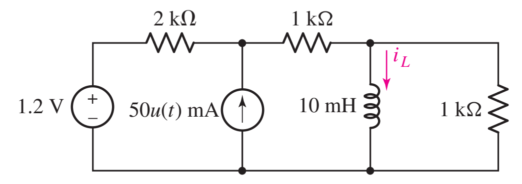


47. Para el circuito de la figura 8.78, (*a*) determine $v_L(0^-)$, $v_L(0^+)$, $i_L(0^-)$ e $i_L(0^+)$; (*b*) calcule $i_L(150\text{ ns})$. (*c*) Verifique su respuesta al inciso (*b*) mediante una simulación PSpice adecuada.



■ **FIGURA 8.78**

48. El circuito representado en la figura 8.79 contiene dos fuentes independientes, una de las cuales está activa solamente para $t > 0$. (*a*) Obtenga una expresión para $i_L(t)$ válida para todo valor de *t*; (*b*) calcule $i_L(t)$ en $t = 10\ \mu\text{s}$, $20\ \mu\text{s}$ y $50\ \mu\text{s}$.

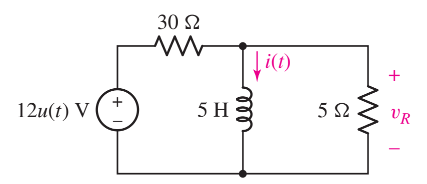


■ **FIGURA 8.79**

■ **FIGURA 8.80**

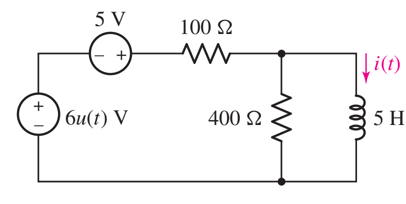
49. El circuito que se muestra en la figura 8.80 está energizado por una fuente que está inactiva para $t < 0$. (*a*) Obtenga una expresión para $i(t)$ válida para todos los valores de *t*. (*b*) Grafique su respuesta dentro del intervalo de $-1\text{ ms} \leq t < 10\text{ ms}$.

50. Para el circuito que se muestra en la figura 8.81, (*a*) obtenga una expresión para $i(t)$ válida para todo tiempo; (*b*) obtenga una expresión para $v_R(t)$ válida para todo tiempo, y (*c*) grafique tanto $i(t)$ como $v_R(t)$ dentro del intervalo $-1\text{ s} < t \leq 6\text{ s}$.



■ **FIGURA 8.81**

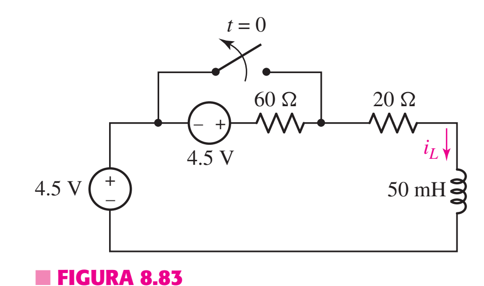
8.7 Respuestas natural y forzada



■ **FIGURA 8.82**

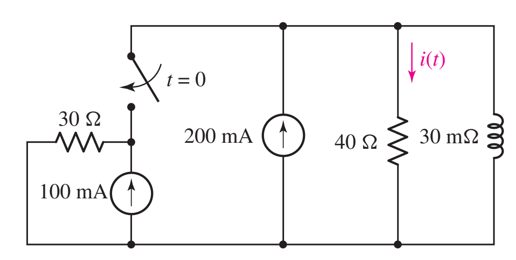
51. Para el circuito de dos fuentes de la figura 8.82, observe que una fuente siempre está activa. (*a*) Obtenga una expresión para $i(t)$ válida para todos los valores de *t*; (*b*) determine en qué tiempo la energía almacenada en el inductor alcanza 99% de su valor máximo.

52. (*a*) Obtenga una expresión para i_L marcada en la figura 8.83 que sea válida para todos los valores de *t*. (*b*) Grafique su resultado dentro del intervalo $-1\text{ ms} \leq t \leq 3\text{ ms}$.



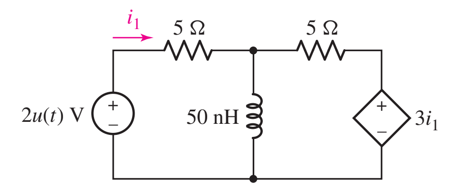
■ **FIGURA 8.83**

53. Obtenga una expresión para $i(t)$ marcado en el diagrama del circuito de la figura 8.84 y determine la potencia que se disipa en la resistencia de 40 Ω en $t = 2.5$ ms.



■ **FIGURA 8.84**

54. Obtenga una expresión para i_1 como se indica en la figura 8.85 que sea válida para todos los valores de t.



■ **FIGURA 8.85**

i(t)
R
9u(t) V
4 H
–9u(t – 1) V

■ **FIGURA 8.86**

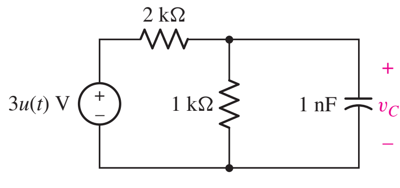
55. Grafique la corriente $i(t)$ en la figura 8.86 si (*a*) $R = 10$ Ω; (*b*) $R = 1$ Ω. ¿En qué caso almacena el inductor (temporalmente) la máxima energía? *Explique*.



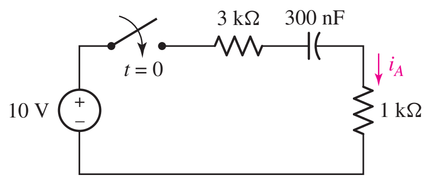
8.8 Accionamiento de circuitos *RC*

56. (*a*) Obtenga una expresión para v_C en el circuito de la figura 8.87 que sea válida para todos los valores de t. (*b*) Grafique $v_C(t)$ en el intervalo $0 \le t \le 4\ \mu$s.

57. Obtenga una ecuación que describa el comportamiento de i_A marcado en la figura 8.88 en el rango $-1\text{ms} \le t \le 5$ ms.



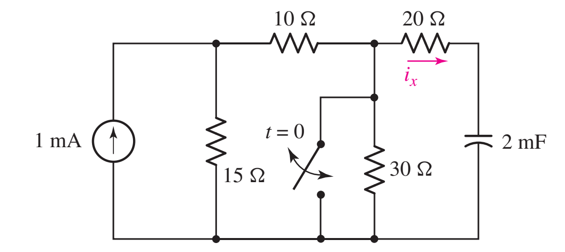
■ **FIGURA 8.87**



■ **FIGURA 8.88**



58. El interruptor en el circuito de la figura 8.89 ha estado cerrado durante un tiempo increíblemente largo antes de abrirse en $t = 0$. (*a*) Calcule la corriente etiquetada i_x en $t = 70$ ms. (*b*) Verifique su respuesta con una simulación PSpice adecuada.



■ **FIGURA 8.89**



59. El interruptor en el circuito de la figura 8.89 ha estado abierto durante un tiempo realmente increíble antes de cerrarse sin mayor ceremonia en $t = 0$. (*a*) Calcule la corriente marcada como i_x en $t = 70$ ms. (*b*) Verifique su respuesta mediante una simulación PSpice adecuada.

60. El interruptor del tipo "cierre antes de corte" que se muestra en la figura 8.90 ha estado en la posición *a* desde que salió en la televisión el primer episodio de "Johnny Quest". Finalmente, se mueve a la posición *b* en el tiempo $t = 0$. (*a*) Obtenga expresiones para $i(t)$ y $v_C(t)$ que sean válidas para todos los valores de *t*. (*b*) Determine la energía que queda en el capacitor en $t = 33$ μs.

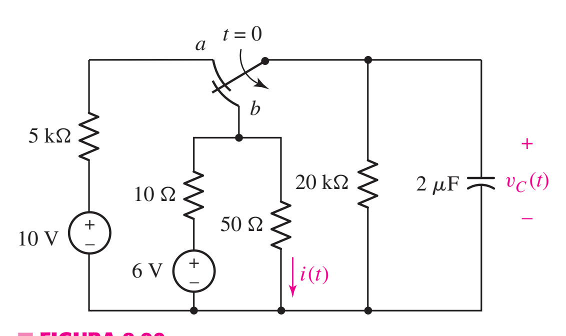


FIGURA 8.90

61. El interruptor en el circuito de la figura 8.91, que se llama con frecuencia un interruptor del tipo *cierre antes de corte* (ya que durante la conmutación hace brevemente contacto con ambas partes del circuito para asegurar una transición eléctrica suave), se mueve a la posición *b* en $t = 0$, únicamente después de haber estado en la posición *a* durante un tiempo suficientemente largo para asegurar que todos los transitorios iniciales que surgieron al activar las fuentes se han extinguido hace tiempo. (*a*) Determine la potencia disipada por la resistencia de 5 Ω en $t = 0^-$. (*b*) Determine la potencia disipada en la resistencia de 3 Ω en $t = 2$ ms.

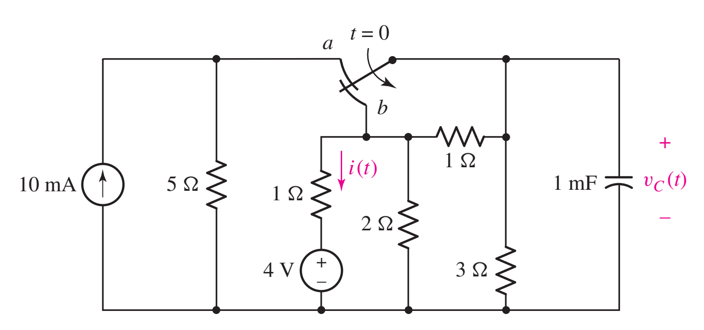


FIGURA 8.91

62. Con referencia al circuito representado en la figura 8.92, (*a*) obtenga una ecuación que describa v_C y que sea válida para todos los valores de *t*; (*b*) determine la energía que permanece en el capacitor en $t = 0^+$, $t = 25$ μs y $t = 150$ μs.

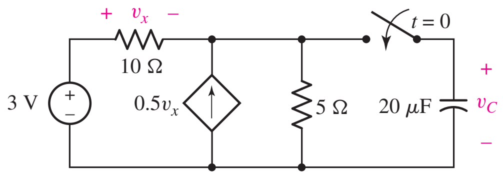


FIGURA 8.92

63. La fuente dependiente que se muestra en la figura 8.92 se instala por desgracia de cabeza durante la fabricación, de modo que la terminal que corresponde a la punta de la flecha está realmente conectada con la terminal de referencia negativa de la fuente de tensión. Esto no lo detecta el grupo de aseguramiento de calidad, de modo que la unidad se embarca con el alambrado incorrecto. El capacitor está inicialmente descargado. Si la resistencia de 5 Ω está clasificada solamente para 2 W, ¿después de cuánto tiempo t es probable que falle el circuito?

64. Para el circuito representado en la figura 8.93, (a) obtenga una expresión para v que sea válida para todos los valores de t; (b) grafique su resultado para $0 \leq t \leq 3$ s.

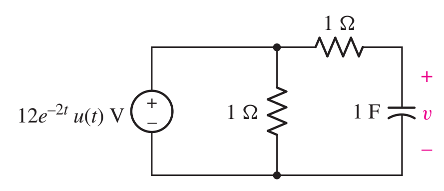


FIGURA 8.93

65. Obtenga una expresión para la tensión v_x marcada en el circuito amp op de la figura 8.94.

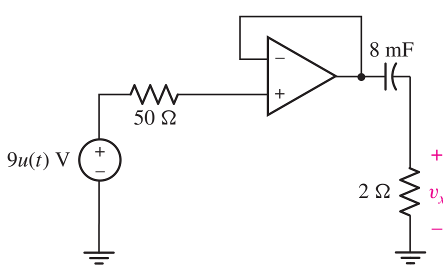


FIGURA 8.94

8.9 Predicción de la respuesta de circuitos conmutados secuencialmente

66. Grafique la corriente i_L del circuito de la figura 8.50a si el inductor de 100 mH se reemplaza por un inductor de 1 nH y se sujeta a la forma de onda $v_s(t)$ igual a
(a) $5u(t) - 5u(t - 10^{-9}) + 5u(t - 2 \times 10^{-9})$ V, $0 \leq t \leq 4$ ns;
(b) $9u(t) - 5u(t - 10^{-8}) + 5u(t - 2 \times 10^{-8})$ V, $0 \leq t \leq 40$ ns;

67. El inductor de 100 mH en el circuito de la figura 8.50a se reemplaza por un inductor de 1 H. Grafique la corriente del inductor i_L si la fuente $v_s(t)$ es igual a
(a) $5u(t) - 5u(t - 0.01) + 5u(t - 0.02)$ V, $0 \leq t \leq 40$ ns;
(b) $5u(t) - 5u(t - 10) + 5u(t - 10.1)$ V, $0 \leq t \leq 11$ ns;



68. Grafique la tensión v_C entre las terminales del capacitor de la figura 8.95 durante por lo menos 3 periodos si $R = 1$ Ω, $C = 1$ F y $v_s(t)$ es una forma de onda de pulsos que tiene (a) un mínimo de 0 V, un máximo de 2 V, tiempos de elevación y caída de 1 ms, ancho de pulso de 10 s y periodo de 10 s; (b) un mínimo de 0 V, un máximo de 2 V, tiempos de elevación y caída de 1 ms, ancho de pulso de 10 ms y periodo de 10 ms. (c) Verifique sus respuestas mediante simulaciones PSpice adecuadas.



69. Dibuje la tensión v_C entre las terminales del capacitor de la figura 8.95 durante por lo menos 3 periodos si $R = 1$ Ω, $C = 1$ F y $v_s(t)$ es una forma de onda de pulsos que tiene (a) un mínimo de 0 V, un máximo de 2 V, tiempos de elevación y caída de 1 ms, ancho de pulso de 10 s y periodo de 10 ms; (b) un mínimo de 0 V, un máximo de 2 V, tiempos de elevación y caída de 1 ms, ancho de pulso de 10 ms y periodo de 10 s. (c) Verifique sus respuestas con simulaciones PSpice adecuadas.

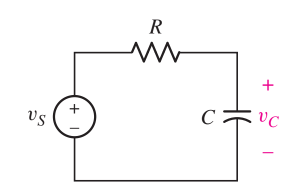
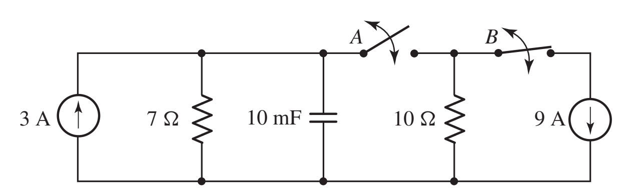


FIGURA 8.95

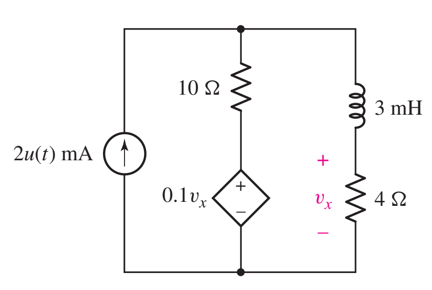
Ejercicios de integración de capítulo

70. El circuito de la figura 8.96 contiene dos interruptores que siempre se mueven en perfecta sincronía. Sin embargo, cuando el interruptor *A* se abre, el interruptor *B* se cierra, y viceversa. El interruptor *A* está inicialmente abierto, mientras que el interruptor *B* está inicialmente cerrado; cambian posiciones cada 40 ms. Usando el nodo inferior como nodo de referencia, determine la tensión entre las terminales del capacitor en *t* igual a (*a*) 0^-; (*b*) 0^+; (*c*) 40^- ms; (*d*) 40^+ ms; (*e*) 50 ms.



■ **FIGURA 8.96**

71. En el circuito de la figura 8.96, cuando el interruptor *A* se abre, el interruptor *B* se cierra, y viceversa. El interruptor *A* está inicialmente abierto, mientras que el interruptor *B* está inicialmente cerrado; cambian posiciones cada 400 ms. Determine la energía en el capacitor en *t* igual a (*a*) 0^-; (*b*) 0^+; (*c*) 200 ms; (*d*) 400^- ms; (*e*) 400^+ ms; (*f*) 700 ms.

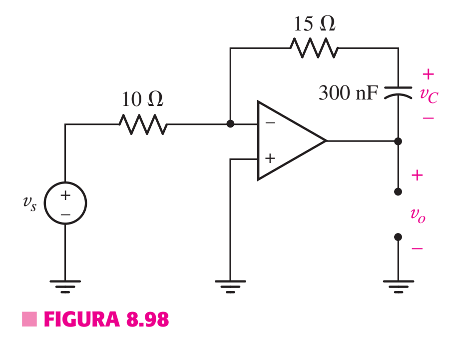


■ **FIGURA 8.97**

72. Con referencia al circuito de la figura 8.97, que contiene una fuente dependiente de tensión controlada por tensión, además de dos resistencias, (*a*) calcule la constante de tiempo del circuito. (*b*) Obtenga una expresión para v_x válida para todos los valores de *t*. (*c*) Grafique la potencia disipada en la resistencia dentro del intervalo de 6 constantes de tiempo. (*d*) Repita los incisos (*a*) a (*c*) si la fuente dependiente se instala en el circuito de cabeza. (*e*) ¿Ambas configuraciones del circuito son "estables"? *Explique.*

73. En el circuito de la figura 8.97, se instala accidentalmente un capacitor de 3 mF en vez del inductor. Por desgracia, ése no es el final del problema, ya que más tarde se determinó que el capacitor real no está realmente bien modelado por un capacitor ideal, y el dieléctrico tiene una resistencia de 10 kΩ (que se debería visualizar como conectada en paralelo con el capacitor ideal). (*a*) Calcule la constante de tiempo del circuito considerando y sin considerar la resistencia del dieléctrico. ¿En cuánto cambia el dieléctrico su respuesta? (*b*) Calcule v_x en $t = 200$ ms. ¿La resistencia del dieléctrico afecta significativamente su respuesta? *Explique*.

74. Para el circuito de la figura 8.98, suponiendo un amp op ideal, deduzca una expresión para $v_o(t)$ si v_s es igual a (*a*) $4u(t)$ V; (*b*) $4e^{-130\,000\,t}u(t)$ V.



■ **FIGURA 8.98**

LECTURAS ADICIONALES

Un excelente análisis del empleo de PSpice en el modelado de sistemas de suspensión de automóviles se puede encontrar en

R. W. Goody, *MicroSim PSpice for Windows*, vol. I, 2a. ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1998.

Un gran número de descripciones detalladas de redes analógicas puede encontrarse en el capítulo 3 de

E. Weber, *Linear Transient Analysis Volume I*, Wiley, Nueva York, 1954. (Este libro se encuentra agotado, pero puede encontrarse en las bibliotecas de muchas universidades.)

EJERCICIOS

9.1 Circuito en paralelo sin fuente

1. Para cierto circuito *RLC* en paralelo sin fuente, $R = 1$ kΩ, $C = 3\ \mu$F y L es tal que la respuesta del circuito está sobreamortiguada. (*a*) Determine el valor de L. (*b*) Escriba la ecuación para la tensión v entre las terminales de la resistencia si se sabe que $v(0^-) = 9$ V y $dv/dt|_{t=0^+} = 2$ V/s.
2. En la construcción de un circuito simple *RLC* en paralelo sin fuente se usan los valores de elementos de 10 mF y 2nH. (*a*) Seleccione R de modo que el circuito esté apenas ligeramente sobreamortiguado. (*b*) Escriba la ecuación para la corriente de la resistencia si su valor inicial es $i_R(0^+) = 13$ pA y $di_E/dt|_{t=0^+} = 1$ nA/s.
3. Si se construye un circuito *RLC* en paralelo con valores de componentes $C = 16$ mF y $L = 1$ mH, elija R de tal manera que el circuito esté (*a*) apenas ligeramente sobreamortiguado; (*b*) apenas ligeramente subamortiguado; (*c*) críticamente amortiguado. (*d*) ¿Su respuesta cambia para el inciso (*a*) si la tolerancia de la resistencia es de 1%? ¿Y si es de 10%? (*e*) Aumente el coeficiente de amortiguación exponencial para el inciso (*c*) en 20%. ¿El circuito está ahora subamortiguado, sobreamortiguado o todavía críticamente amortiguado? *Explique*.
4. Calcule α, ω_0, s_1 y s_2 para un circuito *RLC* en paralelo sin fuente si (*a*) $R = 4\ \Omega$, $L = 2.22$ H y $C = 12.5$ mF; (*b*) $L = 1$ nH, $C = 1$ pF y R es 1% del valor necesario para hacer el circuito subamortiguado. (*c*) Calcule la relación de amortiguamiento para los circuitos de los incisos (*a*) y (*b*).
5. Usted comienza a construir el circuito del ejercicio 1, solamente para encontrar que no hay resistencias de 1 kΩ. De hecho, todo lo que usted puede encontrar, además del capacitor y el inductor, es un trozo de alambre de cobre macizo calibre AWG 24 de 1 metro de longitud. Conectándolo en paralelo con los dos componentes que sí consiguió, calcule los valores de α, ω_0, s_1 y s_2, y verifique que el circuito está todavía sobreamortiguado.
6. Considere un circuito *RLC* en paralelo sin fuente que tiene $\alpha = 10^8\ \text{s}^{-1}$, $\omega_0 = 10^3$ rad/s y $\omega_0 L = 5\ \Omega$. (*a*). Demuestre que las unidades indicadas de ω_0L sean las correctas. (*b*) Calcule s_1 y s_2. (*c*) Escriba la forma general de la respuesta natural para la tensión del capacitor. (*d*) Por sustitución adecuada, verifique que su respuesta al inciso (*c*) sea verdaderamente la solución de la ecuación [1] si el inductor y el capacitor almacenan inicialmente 1 mJ de energía, respectivamente.
7. Se construye un circuito *RLC* en paralelo con $R = 500\ \Omega$, $C = 10\ \mu$F y L tal que el circuito está críticamente amortiguado. (*a*) Determine L. ¿Este valor es grande o pequeño para un componente montado en tarjeta de circuito impreso? (*b*) Agregue una resistencia en paralelo a los componentes actuales de manera que la relación de amortiguación sea igual a 10. (*c*) ¿Aumentar más la relación de amortiguamiento da por resultado un circuito sobreamortiguado, críticamente amortiguado o subamortiguado? *Explique.*

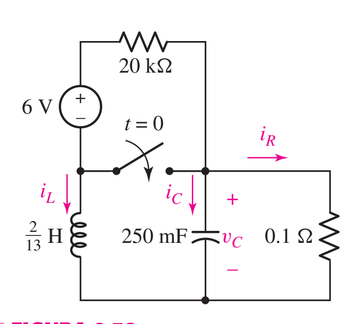
9.2 Circuito *RLC* en paralelo sobreamortiguado

8. El circuito de la figura 9.2 se modifica sustancialmente al reemplazar la resistencia por una de 1 kΩ, cambiar el inductor por un valor más pequeño de 7 mH, reemplazar el capacitor por una alternativa de 1 nF, y ahora el inductor está inicialmente descargado mientras que el capacitor almacena 7.2 mJ. (*a*) Calcule α, ω_0, s_1 y s_2, y verifique que el circuito esté todavía sobreamortiguado. (*b*) Obtenga una expresión para la corriente que fluye a través

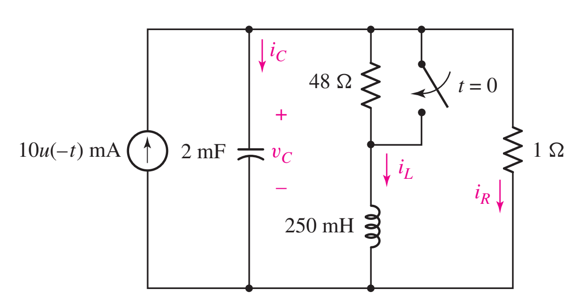
de la resistencia, que sea válida para $t > 0$. (*c*) Calcule la magnitud de la corriente de la resistencia en $t = 10\ \mu s$.



9. Se encuentra que la tensión entre las terminales de un capacitor está dada por $v_C(t) = 10e^{-10t} - 5e^{-4t}$ V. (*a*) Bosqueje cada uno de los dos componentes dentro del intervalo $0 \le t \le 1.5$ s. (*b*) Grafique la tensión del capacitor dentro del mismo intervalo de tiempo.
10. Se encuentra que la corriente que fluye a través de cierto inductor está dada por $i_L(t) = 0.20e^{-2t} - 0.6e^{-3t}$ V. (*a*) Bosqueje cada uno de los dos componentes dentro del intervalo $0 \le t \le 1.5$ s. (*b*) Grafique la corriente del inductor dentro del mismo intervalo de tiempo. (*c*) Grafique la energía que queda en el inductor dentro del intervalo $0 \le t \le 1.5$ s.
11. Se determina que la corriente que fluye a través de una resistencia de 5 Ω en un circuito *RLC* en paralelo sin fuente es $i_R(t) = 2e^{-t} - 3e^{-8t}$ V, $t > 0$. Determine (*a*) la corriente máxima y el tiempo en el que ocurre; (*b*) el tiempo de asentamiento; (*c*) el tiempo t correspondiente al momento en que la resistencia absorbe 2.5 W de potencia.
12. Para el circuito de la figura 9.38, obtenga una expresión para $v_C(t)$ válida para todos los valores de $t > 0$.
13. Considere el circuito representado en la figura 9.38. (*a*) Obtenga una expresión para $i_L(t)$ válida para todo $t > 0$. (*b*) Obtenga una expresión para $i_R(t)$ válida para todo $t > 0$. (*c*) Determine el tiempo de asentamiento tanto para i_L como para i_R.
14. Con referencia al circuito representado en la figura 9.39, determine (*a*) $i_C(0^-)$; (*b*) $i_L(0^-)$; (*c*) $i_R(0^-)$; (*d*) $v_C(0^-)$; (*e*) $i_C(0^+)$; (*f*) $i_L(0^+)$; (*g*) $i_R(0^+)$; (*h*) $v_C(0^+)$.

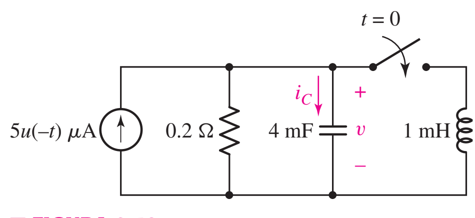


■ **FIGURA 9.38**



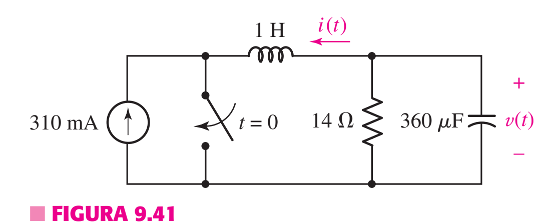
■ **FIGURA 9.39**

15. (*a*) Observando la convención de signo pasivo, obtenga una expresión para la tensión entre las terminales de una resistencia de 1 Ω en el circuito de la figura 9.39 que sea válida para todo $t > 0$. (*b*) Determine el tiempo de asentamiento para la tensión de la resistencia.
16. Respecto al circuito que se presenta en la figura 9.40, (*a*) obtenga una expresión para $v(t)$ que sea válida para todo $t > 0$, (*b*) calcule la corriente máxima del inductor e identifique el tiempo en el que ocurre; (*c*) determine el tiempo de asentamiento.



■ **FIGURA 9.40**

17. Obtenga las expresiones para la corriente $i(t)$ y la tensión $v(t)$ indicados en el circuito de la figura 9.41 que sean válidas para todo $t > 0$.



■ **FIGURA 9.41**



18. Reemplace la resistencia de 14 Ω en el circuito de la figura 9.41 por uno de 1 Ω. (*a*) Obtenga una expresión para la energía almacenada en el capacitor como una función del tiempo, válida para $t > 0$. (*b*) Determine el tiempo en el que la energía en el capacitador se ha reducido a la mitad de su valor máximo. (*c*) Verifique su respuesta mediante una simulación adecuada en PSpice.



19. Diseñe un circuito *RLC* en paralelo, completo, sin fuente, que tenga una respuesta sobreamortiguada, tenga un tiempo de asentamiento de 1 s y tenga una relación de amortiguamiento de 15.

20. Para el circuito representado en la figura 9.42, los dos valores de las resistencias son $R_1 = 0.752\ \Omega$ y $R_2 = 1.268\ \Omega$, respectivamente. (*a*) Obtenga una expresión para la energía almacenada en el capacitor, válida para todo $t > 0$; (*b*) determine el tiempo de amortiguamiento para la corriente marcada como i_A.

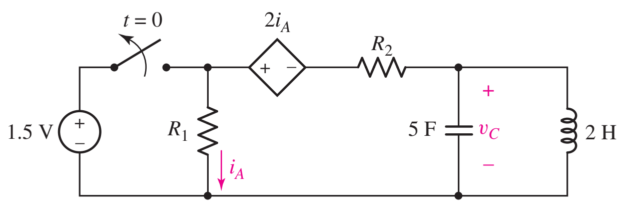


FIGURA 9.42

9.3 Amortiguamiento crítico

21. Una bobina de motor que tiene una inductancia de 8 H está en paralelo con un capacitor de 2 μF y una resistencia de valor desconocido. Se ha determinado que la respuesta de la combinación en paralelo está críticamente amortiguada. (*a*) Determine el valor de la resistencia. (*b*) Calcule α. (*c*) Escriba la ecuación para la corriente que fluye hacia la resistencia si el nodo superior es v, el nodo inferior está conectado a tierra y $v = Ri_r$. (*d*) Verifique que su ecuación es una solución a la ecuación diferencial del circuito,

$$\frac{di_r}{dt} + 2\alpha\frac{di_r}{dt} + \alpha^2 i_r = 0$$

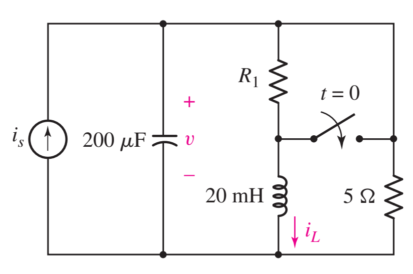
22. La condición para amortiguación crítica en un circuito de *RLC* es que la frecuencia de resonancia ω_0 y el factor exponencial de amortiguamiento α sean iguales. Esto lleva a la relación $L = 4R^2C$, lo cual implica que $1\ \text{H} = 1\Omega^2 \cdot \text{F}$. Verifique esta equivalencia desglosando cada una de las tres unidades a unidades fundamentales SI (vea el capítulo 2).

23. Un circuito *RCL* en paralelo críticamente amortiguado se construye con los valores de componentes 40 Ω, 8 nF y 51.2 μH, respectivamente. (*a*) Verifique que el circuito es en realidad críticamente amortiguado. (*b*) Explique por qué, en la práctica, el circuito, una vez que se fabrica, es poco probable que sea en verdad críticamente amortiguado. (*c*) El inductor al inicio almacena 1mJ de energía, mientras que el capacitor inicialmente está descargado. Determine la magnitud de la tensión del capacitor en $t = 500$ ns, la tensión máxima absoluta del capacitor y el tiempo de asentamiento.



24. Diseñe un circuito *RCL* en paralelo completo (es decir, con todos los interruptores necesarios o con fuentes de función escalón) que tenga una respuesta críticamente amortiguada, de modo que la tensión del capacitor en $t = 1$ s sea igual a 9 V y el circuito sea sin fuente para todo $t > 0$.

25. Un circuito *RCL* críticamente amortiguado se construye con valores de componentes de 40 Ω y 2 pF. (*a*) Determine el valor de *L*, teniendo cuidado de no sobrerredondear. (*b*) Explique por qué, en la práctica, una vez fabricado el circuito es poco probable que esté en verdad críticamente amortiguado. (*c*) El inductor inicialmente no almacena energía, mientras que el capacitor inicialmente almacena 10 pJ. Determine la potencia absorbida por la resistencia en $t = 2$ ns, la corriente absoluta máxima del inductor $|i_L|$ y el tiempo de asentamiento.



■ **FIGURA 9.43**

26. Para el circuito de la figura 9.43, $i_s(t) = 30\mu(-t)$ mA. (*a*) Seleccione R_1 de modo que $v(0^+) = 6$ V. (*b*) Calcule $v(2\text{ ms})$. (*c*) Determine el tiempo de asentamiento de la tensión del capacitor. (*d*) ¿El tiempo de asentamiento de la corriente del inductor es el mismo que su respuesta al inciso (*c*)?

27. La fuente de corriente de la figura 9.43 es $i_s(t) = 10\mu(1 - t)$ μA. (*a*) Seleccione R_1 de tal manera que $i_L(0^+) = 2\mu$A. Calcule i_L en $t = 500$ ms y $t = 1.002$ ms.

28. El inductor en el circuito de la figura 9.41 se cambia de tal manera que la respuesta del circuito esté ahora críticamente amortiguada. (*a*) Determine el nuevo valor del inductor. (*b*) Calcule la energía almacenada tanto en el inductor como en el capacitor en $t = 10$ ms.

29. El circuito de la figura 9.42 se reconstruye de tal manera que la cantidad de control de la fuente dependiente sea ahora de $100i_A$, se cambie el capacitor por uno de 2 μF y $R_1 = R_2 = 10\ \Omega$. (*a*) Calcule el valor del inductor necesario para obtener una respuesta críticamente amortiguada. (*b*) Determine la potencia que absorbe R_2 en $t = 300$ μs.

9.4 Circuito *RLC* en paralelo subamortiguado

30. (*a*) Respecto al circuito *RLC* en paralelo, deduzca una expresión para *R* en términos de *C* y *L* para asegurar que la respuesta sea subamortiguada. (*b*) Si $C = 1$ nF y $L = 10$ mH, seleccione *R* de manera que (apenas) se obtenga una respuesta subamortiguada. (*c*) Si la relación de amortiguamiento se aumenta, ¿el circuito se vuelve más o menos subamortiguado? *Explique*. (*d*) Calcule α y ω_d para el valor de *R* que usted seleccionó en el inciso (*b*).

31. El circuito de la figura 9.1 se construye usando valores de componentes 10 kΩ, 72 μH y 18 pF. (*a*) Calcule α, ω_d y ω_0. ¿El circuito está sobreamortiguado, críticamente amortiguado o subamortiguado? (*b*) Escriba la forma de la respuesta natural de la tensión en el capacitor $v(t)$. (*c*) Si el capacitor almacena inicialmente 1 nJ de energía, calcule v en $t = 300$ ns.

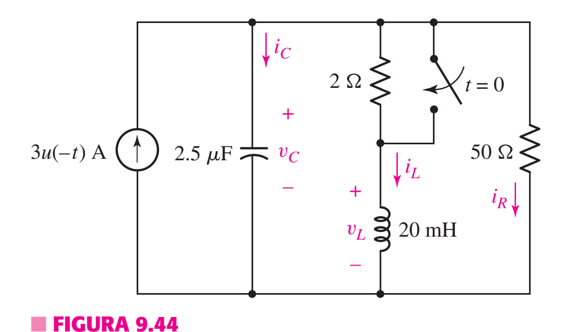
32. El circuito sin fuente representado en la figura 9.1 se construye usando un inductor de 10 mH, un capacitor de 1 mF y una resistencia de 1.5 kΩ. (*a*) Calcule α, ω_d y ω_0. (*b*) Escriba la ecuación que describa la corriente *i* para $t > 0$. (*c*) Determine el valor máximo de *i* y el tiempo en el que ocurre, si el inductor no almacena inicialmente energía y $v(0^-) = 9$ V.

33. (*a*) Grafique la corriente *i* para el circuito descrito en el ejercicio 32 para valores de la resistencia 1.5 kΩ, 15 kΩ y 150 kΩ. Haga tres gráficas separadas y asegúrese de extender el eje de tiempo correspondiente a $6\pi/\omega_d$ en cada caso. (*b*) Determine los tiempos de asentamiento correspondientes.



34. Analice el circuito descrito en el ejercicio 32 para encontrar $v(t)$ para $t > 0$, si *R* es igual a (*a*) 2 kΩ; (*b*) 2 Ω. (*c*) Grafique ambas respuestas en el intervalo $0 \leq t \leq 60$ ms. (*d*) Verifique sus respuestas mediante las simulaciones adecuadas en PSpice.

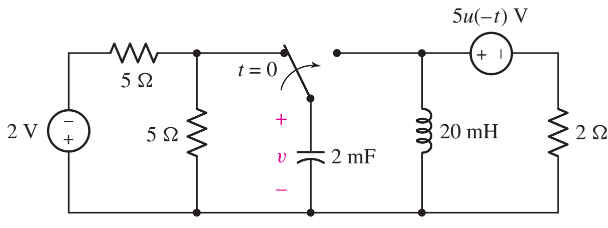
35. Para el circuito de la figura 9.44, determine (*a*) $i_C(0^-)$; (*b*) $i_L(0^-)$; (*c*) $i_R(0^-)$; (*d*) $v_C(0^-)$; (*e*) $i_C(0^+)$; (*f*) $i_L(0^+)$; (*g*) $i_R(0^+)$; (*h*) $v_C(0^+)$.



■ **FIGURA 9.44**

36. Obtenga una expresión para $v_L(t)$ para $t > 0$, para el circuito que se muestra en la figura 9.44. Grafique la forma de onda para por lo menos dos periodos de oscilación.

37. Para el circuito de la figura 9.45, determine (*a*) el primer tiempo $t > 0$ en que $v(t) = 0$; (*b*) el tiempo de asentamiento.



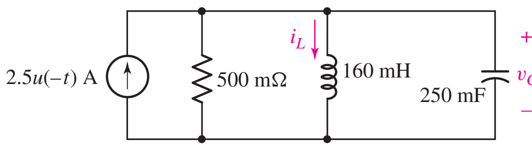
■ **FIGURA 9.45**



38. (*a*) Diseñe un circuito *RLC* en paralelo que suministre una tensión de capacitor que oscile a la frecuencia de 100 rad/s, con un valor máximo de 10 V que ocurra en $t = 0$, y los segundo y tercero máximos sean ambos superiores a 6 V. (*b*) Verifique su diseño con una simulación adecuada en PSpice.

DP

39. El circuito representado en la figura 9.46 es apenas subamortiguado. (*a*) Calcule α y ω_d. (*b*) Obtenga una expresión para $i_L(t)$ válida para $t > 0$. (*c*) Determine cuánta energía se almacena en el capacitor y en el inductor, en $t = 200$ ms.



■ **FIGURA 9.46**

40. Al construir el circuito de la figura 9.46, inadvertidamente instaló usted una resistencia de 500 MΩ, por error. (*a*) Calcule α y ω_d. (*b*) Obtenga una expresión para $i_L(t)$ válida para $t > 0$. (*c*) Determine cuánto tarda la energía almacenada en el inductor para llegar a 10% de su valor máximo.

9.5 Circuito *RLC* en serie sin fuente

41. El circuito de la figura 9.21*a* se construye con un capacitor de 160 mF y un inductor de 250 mH. Determine el valor de *R* que se necesita para obtener (*a*) una respuesta críticamente amortiguada; (*b*) una respuesta "apenas" subamortiguada. (*c*) Compare sus respuestas con los incisos (*a* y (*b*) si el circuito fuera un circuito *RLC* en paralelo.

42. Se usan valores de componentes $R = 2\ \Omega$, $C = 1$ mF y $L = 2$ mH para construir el circuito representado en la figura 9.21*a*. Si $v_C(0^-) = 1$ V y no fluye una corriente inicial a través del inductor, calcule $i(t)$ en $t = 1$ ms, 2 ms y 3 ms.

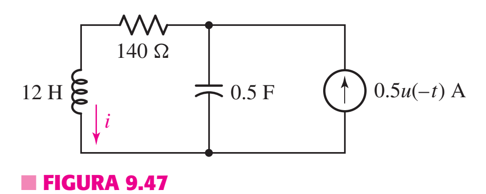
43. El circuito de *RLC* en serie que se describe en el ejercicio 42 se modifica ligeramente agregando una resistencia de 2 Ω en paralelo con la resistencia existente. La tensión inicial del capacitor sigue siendo de 1 V, y todavía no fluye corriente en el inductor antes de $t = 0$. (*a*) Calcule $v_C(t)$ en 4 ms. (*b*) Bosqueje $v_C(t)$ en el intervalo $0 \le t \le 10$ s.



44. El circuito simple de tres elementos *RLC* en serie del ejercicio 42 se construye con los mismos valores de componentes, pero la tensión inicial del capacitor es $v_C(0^-) = 2$ V, y la corriente inicial del conductor $i(0^-) = 1$ mA. (*a*) Obtenga una expresión para $i(t)$ válida para todo $t > 0$. (*b*) Verifique su solución con una simulación adecuada.

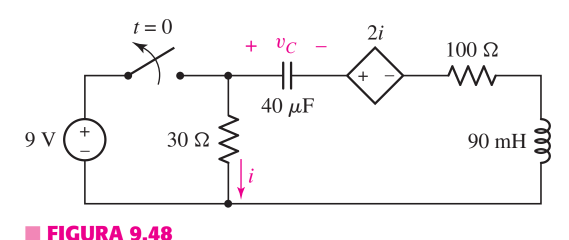
45. El circuito *RLC* en serie de la figura 9.22 se construye usando $R = 1$ kΩ, $C = 2$ mF y $L = 1$ mH. La tensión inicial del capacitor v_C es de -4 V en $t = 0^-$. Inicialmente no fluye corriente a través del inductor. (*a*) Obtenga una expresión para $v_C(t)$ válida para $t > 0$. (*b*) Haga un bosquejo en el intervalo $0 \le t \le 6\ \mu$s.

46. Con referencia al circuito representado en la figura 9.47, calcule (*a*) α; (*b*) ω_0; (*c*) $i(0^+)$; (*d*) $di/dt|_{0^+}$; (*e*) $i(t)$ en $t = 6$ s.



■ **FIGURA 9.47**

47. Obtenga una ecuación para v_C indicada en el circuito de la figura 9.48 que sea válida para todo valor de $t > 0$.

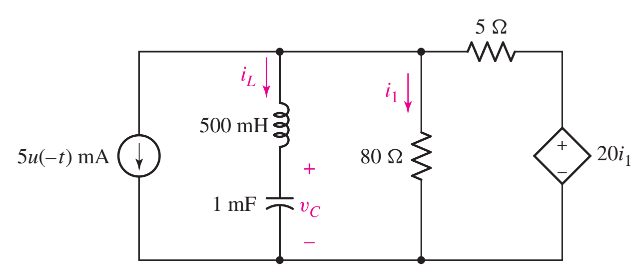


■ **FIGURA 9.48**



48. Con referencia al circuito de *RLC* en serie de la figura 9.48, (*a*) obtenga una expresión para i, válida para $t > 0$; (*b*) calcule $i(0.8 \text{ ms})$ e $i(4 \text{ ms})$; (*c*) verifique sus respuestas para el inciso (*b*) mediante una simulación adecuada en PSpice.

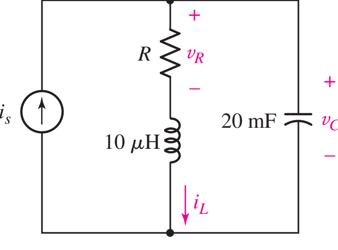
49. Obtenga una expresión para i_1 marcada en la figura 9.49 que sea válida para todo $t > 0$.



■ **FIGURA 9.49**

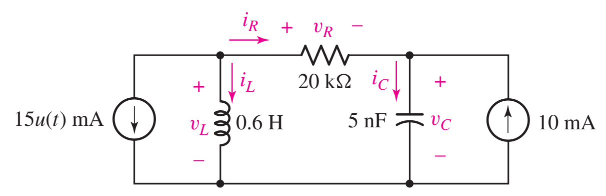
9.6 Respuesta completa del circuito *RLC*

50. En el circuito en serie de la figura 9.50, haga $R = 1\ \Omega$. (*a*) Calcule α y ω_0. (*b*) Si $i_s = 3u(-t) + 2u(t)$ mA, determine $v_R(0^-)$, $i_L(0^-)$, $v_C(0^-)$, $v_R(0^+)$, $i_L(0^-)$, $v_C(0^+)$, $i_L(\infty)$ y $v_C(\infty)$.



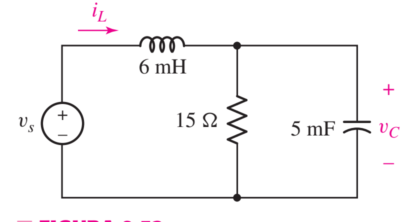
■ **FIGURA 9.50**

51. Calcule la derivada de cada variable de corriente y tensión marcadas en la figura 9.51 en $t = 0^+$.



■ **FIGURA 9.51**

52. Considere el circuito descrito en la figura 9.52. Si $v_s(t) = -8 + 2u(t)$ V determine (*a*) $v_C(0^+)$; (*b*) $i_L(0^+)$; (*c*) $v_C(\infty)$; (*d*) $v_C(t = 150 \text{ ms})$.



■ **FIGURA 9.52**

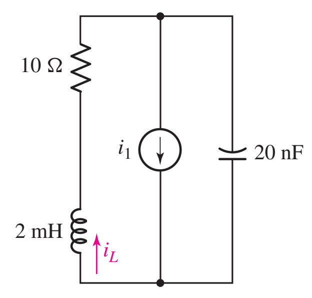
53. La resistencia de 15 Ω en el circuito de la figura 9.52 se reemplaza por una alternativa de 500 mΩ. Si la tensión de la fuente está dada por $v_s = 1 - 2u(t)$ V, determine (*a*) $i_L(0^+)$; (*b*) $v_C(0^+)$; (*c*) $i_L(\infty)$: (*d*) $v_C(4 \text{ ms})$.

54. En el circuito que se muestra en la figura 9.53, obtenga una expresión para i_L válida para todo $t > 0$ si $i_1 = 8 - 10u(t)$ mA.

55. La resistencia de 10 Ω en el circuito de *RLC* en serie de la figura 9.53 se reemplaza por una de 1 kΩ. La fuente $i_1 = 5u(t) - 4$mA. Obtenga una expresión para i_L válida para todo $t > 0$.



56. Para el circuito representado en la figura 9.54, (*a*) obtenga una expresión para $v_C(t)$ válida para todo $t > 0$. (*b*) Determine v_C en $t = 10$ ms y $t = 600$ ms. (*c*) Verifique sus respuestas del inciso (*b*) mediante una simulación adecuada en PSpice.

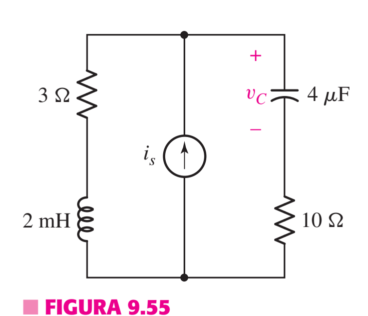


■ **FIGURA 9.53**

■ **FIGURA 9.54**

57. Reemplace la resistencia de 1 Ω en la figura 9.54 por una resistencia de 100 mΩ, y la resistencia de 5 Ω por otra de 200 mΩ. Considerando la convención del signo pasivo, obtenga una expresión para la corriente del capacitor que sea válida para $t > 0$.

58. Con referencia al circuito de la figura 9.55, obtenga una expresión para v_C válida para $t \geq 0$ si $i_s(t) = 3u(-t) + 5u(t)$ mA.



■ **FIGURA 9.55**

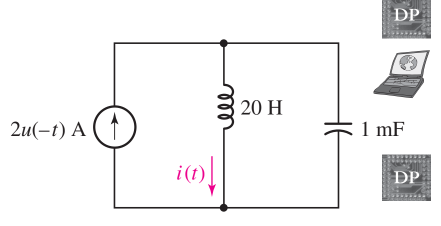
59. (*a*) Ajuste el valor de la resistencia de 3 Ω en el circuito de la figura 9.55 para obtener una respuesta “apenas” sobreamortiguada. (*b*) Determine el primer instante ($t > 0$) en el que se almacena una cantidad de energía igual (y diferente a cero) en el capacitor y en el inductor si $i_s(t) = 2u(t)$ A. (*c*) Calcule la energía correspondiente. (*d*) ¿En qué tiempo subsecuente la energía almacenada en el inductor será el *doble* de la energía almacenada en el capacitor en el mismo instante?

9.7 Circuito *LC* sin pérdidas




60. Diseñe un circuito de amp op para hacer el modelo para la respuesta en tensión del circuito *LC* que se muestra en la figura 9.56. Verifique el diseño simulando el circuito de la figura 9.56 y su circuito empleando un amp op LF 411, suponiendo $v(0) = 0$ e $i(0) = 1$ mA.

■ **FIGURA 9.56**



■ **FIGURA 9.57**

61. Observe la figura 9.57 y diseñe un circuito de amp op cuya salida sea $i(t)$ para $t > 0$.

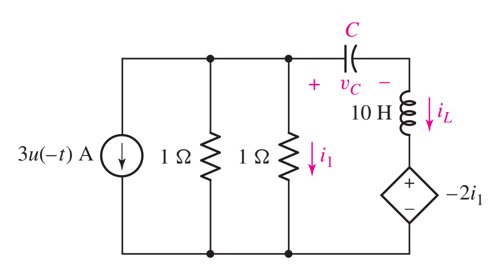
62. Sustituya el capacitor del circuito de la figura 9.56 por un inductor de 20 H en paralelo con un capacitor de 5 μF. Diseñe un circuito de amp op cuya salida sea $i(t)$ para $t > 0$.Verifique el diseño simulando el circuito de capacitor-inductor y su circuito de amp op. Utilice un amp op LM111 en la simulación con PSpice.

63. Un circuito *RC* sin fuente se construye con una resistencia de 1 kΩ y un capacitor de 3.3 mF. La tensión inicial en el capacitor es de 1.2 V. (*a*) Escriba la ecuación diferencial de v (la tensión en el capacitor) para $t > 0$. Diseñe un circuito de amp op que proporcione $v(t)$ como salida.

64. Un circuito *RL* sin fuente contiene una resistencia de 20 Ω y un inductor de 5 H. Si el valor inicial de la corriente del inductor es de 2 A: (*a*) escriba la ecuación diferencial relativa a i para $t > 0$, (*b*) diseñe un integrador de amp op para proporcionar $i(t)$ como salida, utilizando $R_1 = 1$ MΩ y $C_f = 1$ μF.

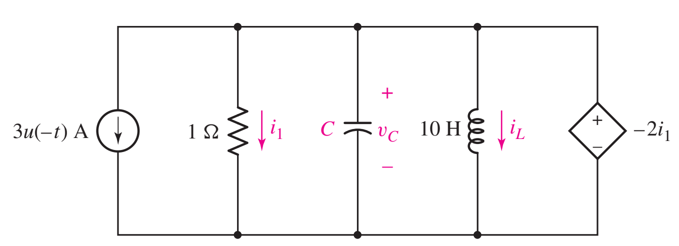
Ejercicios de integración de capítulo

65. Al capacitor del circuito de la figura 9.58 se le da un valor de 1 F. Determine $v_C(t)$ en (*a*) $t = -1$ s; (*b*) $t = 0^+$; (*c*) $t = 20$ s.



■ **FIGURA 9.58**

66. (*a*) ¿Qué valor de C para el circuito de la figura 9.59 dará como resultado una respuesta sobreamortiguada? (*b*) Haga $C = 1$ F y obtenga una expresión para $i_L(t)$ válida para $t > 0$.



■ **FIGURA 9.59**

67. Obtenga una expresión para la corriente marcada como i_1 en el circuito de la figura 9.58 que sea válida para $t > 0$, si la fuente de corriente se reemplaza por una fuente $5u(t + 1)$ A.



68. Diseñe un circuito de *RLC* en paralelo que produzca un pulso senoidal exponencialmente amortiguado con una tensión pico de 1.5 V y por lo menos dos picos adicionales con magnitud de tensión mayor que 0.8 V. Verifique su diseño mediante una simulación adecuada en PSpice.



69. Diseñe un circuito de *RLC* en serie que produzca un pulso senoidal exponencialmente amortiguado con una tensión pico de 1.5 V y por lo menos dos picos adicionales con magnitud de tensión mayor que 0.8 V. Verifique su diseño mediante una simulación adecuada en PSpice.

- Todas las técnicas de análisis usadas en los circuitos resistivos se aplican a los circuitos con capacitores y/o inductores una vez que todos los elementos se sustituyen por sus equivalentes en el dominio de la frecuencia. (Ejemplos 10.5, 10.7, 10.8, 10.9, 10.10, 10.11)
- El análisis fasorial sólo se efectúa sobre circuitos de una sola frecuencia. En otro caso, debe recurrirse a la superposición y sumarse las respuestas parciales en el *dominio del tiempo*, a fin de obtener la respuesta completa. (Ejemplo 10.12)
- El poder que tienen los diagramas fasoriales es evidente cuando una función forzada conveniente se utiliza desde un inicio y el resultado inicial se escala apropiadamente. (Ejemplo 10.13)

LECTURAS ADICIONALES

Una buena referencia sobre las técnicas de análisis basadas en fasores se puede encontrar en:

R. A. DeCarlo y P. M. Lin, *Linear Circuit Analysis*, 2a. ed. Nueva York: Oxford University Press, 2001.

Los modelos de transistores dependientes de la frecuencia se estudian desde una perspectiva fasorial en el capítulo 7 de:

W. H. Hayt, Jr. y G. W. Neudeck, *Electronic Circuit Analysis and Design*, 2a. ed. Nueva York: Wiley, 1995.

EJERCICIOS

10.1 Características de las senoides

1. Calcule lo siguiente: (*a*) 5 sen $(5t - 9°)$ en $t = 0$, 0.01 y 0.1 s; (*b*) 4 cos $2t$ y 4 sen $(2t + 90°)$ en $t = 0.1$ y 1.5 s; (*c*) 3.2 cos $(6t + 15°)$ y 3.2 sen $(6t + 105°)$ en $t = 0$, 0.01 y 0.1 s.
2. (*a*) Exprese cada una de las siguientes expresiones como una sola función *de coseno*: 5 sen $300t$, 1.95 sen $(\pi t - 92°)$, 2.7 sen $(50t + 5°) - 10$ cos $50t$. (*b*) Exprese cada una de las siguientes expresiones como una sola función *de seno*: 66 cos $(9t - 10°)$, 4.15 cos $10t$, 10 cos $(100t - 9°) + 10$ sen $(100t + 19°)$.
3. Determine el ángulo en el que v_1 *adelanta* a i_1 si $v_1 = 10 \cos(10t - 45°)$ e i_1 es igual a (*a*) 5 cos $10t$; (*b*) 5 cos $(10t - 80°)$; (*c*) 5 cos $(10t - 40°)$; (*d*) 5 cos $(10t + 40°)$; (*e*) 5 sen $(10t - 19°)$.
4. Determine el ángulo en el que v_1 *está en atraso* con respecto a i_1 si $v_1 = 34 \cos(10t + 125°)$ e i_1 es igual a (*a*) 5 cos $10t$; (*b*) 5 cos $(10t - 80°)$; (*c*) 5 cos $(10t - 40°)$; (*d*) 5 cos $(10t + 40°)$; (*e*) 5 sen $(10t - 19°)$.
5. Determine qué forma de onda está en atraso en cada uno de los siguientes pares: (*a*) cos $4t$, sen $4t$; (*b*) cos $(4t - 80°)$, cos $(4t)$; (*c*) cos $(4t + 80°)$, cos $4t$; (*d*) $-$sen $5t$, cos $(5t + 2°)$; (*e*) sen $5t$ + cos $5t$, cos $(5t - 45°)$.
6. Calcule los primeros tres instantes en el tiempo $(t > 0)$ en los que son cero las siguientes funciones, primero convirtiendo a una sola senoidal: (*a*) cos $3t - 7$ sen $3t$; (*b*) cos $(10t + 45°)$; (*c*) cos $5t$ − sen $5t$; (*d*) cos $2t$ + sen $2t$ − cos $5t$ + sen $5t$.



7. (*a*) Determine los primeros dos instantes en el tiempo $(t > 0)$ en los que cada una de las funciones en el ejercicio 6 son iguales a la unidad, convirtiendo primero a una sola senoidal. (*b*) Verifique sus respuestas graficando cada forma de onda usando un paquete adecuado de software.



8. El concepto de la serie de Fourier es un eficaz medio para analizar formas de onda periódicas en términos de senoidales. Por ejemplo, la onda triangular de la figura 10.45 se puede representar por la suma infinita

$$v(t) = \frac{8}{\pi^2}\left(\operatorname{sen}\pi t - \frac{1}{3^2}\operatorname{sen}3\pi t + \frac{1}{5^2}\operatorname{sen}5\pi t - \frac{1}{7^2}\operatorname{sen}7\pi t + \cdots\right)$$

donde en la práctica, quizá, los primeros términos proporcionan una aproximación suficientemente exacta. (*a*) Calcule el valor exacto de $v(t)$ en $t = 0.25$ s obteniendo primero una ecuación para el segmento correspondiente de la forma de onda. (*b*) Calcule el valor aproximado en $t = 0.25$ s usando sólo el primer término de la serie de Fourier. (*c*) Repita el inciso (*b*) usando los primeros tres términos. (*d*) Grafique $v(t)$ usando sólo el primer término. (*e*) Grafique $v(t)$ usando sólo los primeros dos términos. (*f*) Grafique $v(t)$ usando sólo los primeros tres términos.

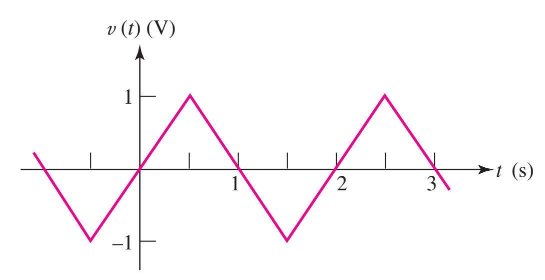


FIGURA 10.45

9. Las tensiones eléctricas domésticas casi siempre se indican como 110 V, 115 V o 120 V. Sin embargo, estos valores no representan la tensión de ca máxima. Más bien, señalan lo que se conoce como la raíz cuadrática media de la tensión, definida como

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T V_m^2 \cos^2(t\omega)\, dt}$$

donde $T =$ periodo de la forma de onda, V_m es la tensión máxima y $\omega =$ la frecuencia de la forma de onda ($f = 60$ Hz en Norteamérica).

(*a*) Efectúe la integración indicada y demuestre que para una tensión senoidal se tiene

$$V_{\text{rms}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

(*b*) Calcule las tensiones máximas correspondientes a las tensiones rms de 110, 115 y 120 V.

10.2 Respuesta forzada a funciones senoidales

10. Si la fuente v_s en la figura 10.46 es igual a 4.53 cos $(0.333 \times 10^{-3} t + 30°$ V, (*a*) obtenga i_s, i_L e i_R en $t = 0$, suponiendo que no hay transitorios presentes. (*b*) Obtenga una expresión para $v_L(t)$ en términos de una sola senoidal, válida para $t > 0$, nuevamente suponiendo que no hay transitorios.

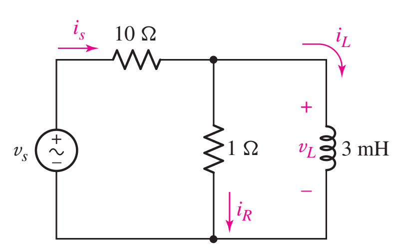


FIGURA 10.46

11. Suponiendo que ya no hay transitorios presentes, determine la corriente marcada como i_L en el circuito de la figura 10.47. Exprese su respuesta como una sola senoidal.

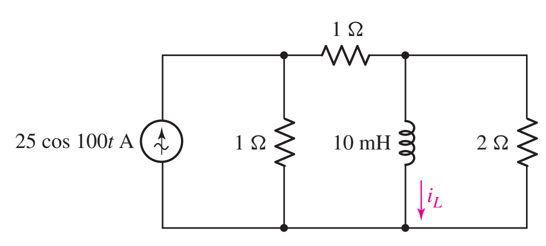
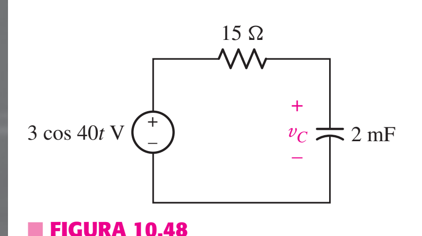


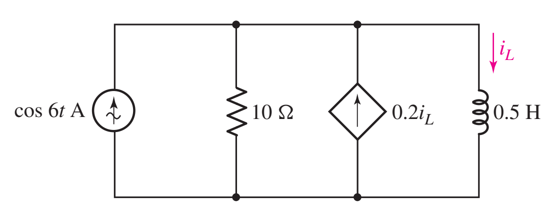
FIGURA 10.47



■ **FIGURA 10.48**

12. Calcule la potencia disipada en la resistencia de 2 Ω de la figura 10.47, suponiendo que no hay transitorios. Exprese su respuesta en términos de una sola función sinusoidal.
13. Obtenga una expresión para v_C indicada en la figura 10.48 en términos de una sola función senoidal. Usted puede suponer que todos los transitorios se han extinguido mucho antes de $t = 0$.
14. Calcule la energía almacenada en el capacitor del circuito de la figura 10.48 en $t = 10$ ms y $t = 40$ ms.

15. Obtenga una expresión para la potencia disipada en la resistencia de 10 Ω de la figura 10.49, suponiendo que no hay transitorios.



■ **FIGURA 10.49**

10.3 Función forzada compleja

16. Exprese los siguientes números complejos en forma rectangular: (*a*) $50\,\underline{/-75°}$; (*b*) $19e^{j30°}$; $2.5\,\underline{/-30°} + 0.5\,\underline{/45°}$. Convierta lo siguiente a forma polar: (*c*) $(2 + j2)\,(2 - j2)$; (*d*) $(2 + j2)\,(5\,\underline{/22°})$.
17. Exprese lo siguiente en forma polar: (*a*) $2 + e^{j35°}$; (*b*) $(j)(j)(-j)$; (*c*) 1. Exprese lo siguiente en forma rectangular: (*d*) $2 + e^{j35°}$; (*e*) $-j9 + 5\underline{/55°}$.
18. Calcule lo siguiente y exprese su respuesta en forma polar:

    (*a*) $4(8 - j8)$; (*b*) $4\underline{/5°} - 2\underline{/15°}$; (*c*) $(2 + j9) - 5\underline{/0°}$; (*d*) $\dfrac{-j}{10 + 5j} - 3\underline{/40°} + 2$;
    (*e*) $(10 + j5)\,(10 - j5)\,(3\underline{/40°}) + 2$.

19. Calcule lo siguiente y exprese su respuesta en forma rectangular:

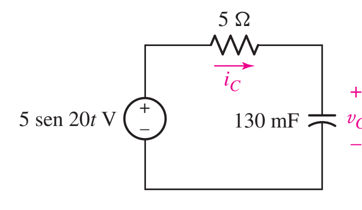
    (*a*) $3\,(3\underline{/30°})$; (*b*) $2\underline{/25°} + 5\underline{/-10°}$; (*c*) $(12 + j90) - 5\underline{/30°}$;
    (*d*) $\dfrac{10 + 5j}{8 - j} + 2\underline{/60°} + 1$; (*e*) $(10 + 5j)\;(10 - 5j)\;(3\underline{/40°}) + 2$.

20. Realice las operaciones indicadas y exprese la respuesta tanto en forma rectangular como en forma polar:

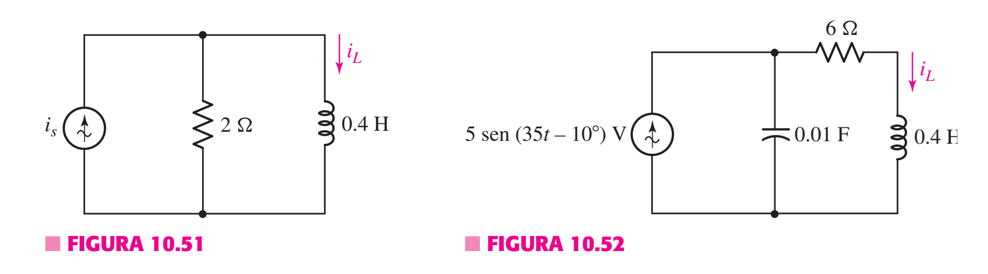
    (*a*) $\dfrac{2 + j3}{1 + 8\underline{/90°}} - 4$; (*b*) $\left(\dfrac{10\underline{/25°}}{5\underline{/-10°}} + \dfrac{3\underline{/15°}}{3 - j5}\right) j2$;

    (*c*) $\left[\dfrac{(1 - j)(1 + j) + 1\underline{/0°}}{-j}\right](3\underline{/-90°}) + \dfrac{j}{5\underline{/-45°}}$.

21. Inserte una fuente compleja adecuada en el circuito representado en la figura 10.50 y úsela para determinar las expresiones de estado estable para $i_C(t)$ y $v_C(t)$.
22. Para el circuito de la figura 10.51, si $i_s = 5 \cos 10t$ A, use la sustitución por fuente compleja para obtener una expresión de estado estable para $i_L(t)$.
23. En el circuito representado en la figura 10.51, i_s se modifica de tal manera que la resistencia de 2 Ω se reemplaza por una de 20 Ω. Si $i_L(t) = 62.5\,\underline{/31.3°}$ mA, determine i_s.
24. Use una fuente compleja adecuada para determinar la corriente i_L en estado estable en el circuito de la figura 10.52.



■ **FIGURA 10.50**



■ **FIGURA 10.51**

■ **FIGURA 10.52**

10.4 Fasor

25. Transforme cada una de las siguientes expresiones en forma fasorial: (*a*) 75.928 cos (110.1t); (*b*) 5 cos (55t − 42°); (*c*) −sen (8 000t + 14°); (*d*) 3 cos 10t − 8 cos (10t + 80°).

26. Transforme cada una de las siguientes expresiones en forma fasorial: (*a*) 11 sen 100t; (*b*) 11 cos 100t; (*c*) 11 cos (100t −90°); (*d*) 3 cos 100t − 3 sen 100t.

27. Suponiendo una frecuencia de operación de 1 kHz, transforme las siguientes expresiones fasoriales en una sola función de coseno en el dominio del tiempo: (*a*) $9\ \underline{/65°}$ V;

(*b*) $\dfrac{2\underline{/31°}}{4\underline{/25°}}$ A; (*c*) $22\underline{/14°} - 8\underline{/33°}$ V.

28. Las siguientes tensiones complejas están escritas en una combinación de forma rectangular y polar. Reescriba cada una, usando notación fasorial convencional (es decir, una magnitud y un ángulo): (*a*) $\dfrac{2-j}{5\underline{/45°}}$ V; (*b*) $\dfrac{6\underline{/20°}}{1000} - j$ V; (*c*) $(j)(52.5\underline{/-90°})$ V.

29. Suponiendo una frecuencia de operación de 50 Hz, calcule la tensión instantánea en $t = 10$ ms y $t = 25$ ms para cada una de las cantidades representadas en el ejercicio 26.

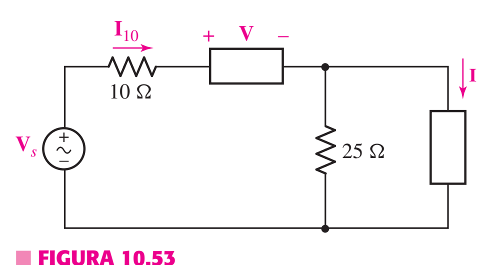
30. Suponiendo una frecuencia de operación de 50 Hz, calcule la tensión instantánea en $t = 10$ ms y $t = 25$ ms para cada una de las cantidades representadas en el ejercicio 27.

31. Considerando la convención del signo pasivo y una frecuencia de operación de 5 rad/s, calcule la tensión fasorial que se genera entre las terminales de los siguientes elementos cuando circula la corriente fasorial $\mathbf{I} = 2\ \underline{/0°}$ mA: (*a*) una resistencia de 1 kΩ; (*b*) un capacitor de 1 mF; (*c*) un inductor de 1 nH.

32. (*a*) Se forma una conexión en serie entre una resistencia de 1 Ω, un capacitor de 1 F y un inductor de 1 H, en ese orden. Suponiendo una operación de $\omega = 1$ rad/s, ¿cuál es la magnitud y cuál es el ángulo de fase de la corriente fasorial que da una tensión de $1\underline{/30°}$ V entre las terminales de la resistencia (observe la convención de signo pasivo)? (*b*) Calcule la relación de la tensión fasorial entre las terminales de la resistencia a la tensión fasorial que aparece entre las terminales de la combinación capacitor-inductor. (*c*) Si se duplica la frecuencia, calcule la nueva relación de la tensión fasorial entre las terminales de la resistencia a la tensión fasorial entre las terminales de la combinación capacitor-inductor.

33. Considerando la convención de signo pasivo y suponiendo una frecuencia de operación de 314 rad/s, calcule la tensión fasorial **V** que aparece entre las terminales de cada uno de los siguientes elementos cuando circula la corriente fasorial $\mathbf{I} = 10\underline{/0°}$ mA: (*a*) una resistencia de 2 Ω; (*b*) un capacitor de 1 F; (*c*) un inductor de 1 H; (*d*) una resistencia de 2 Ω en serie con un capacitor de 1 F; (*e*) una resistencia de 2 Ω en serie con un inductor de 1 H. (*f*) Calcule el valor instantáneo de cada tensión determinada en los incisos (*a*) a (*e*) en $t = 0$.

34. En el circuito de la figura 10.53, que se muestra en el dominio fasorial (de frecuencia), se determina $\mathbf{I}_{10}$ como $2\underline{/42°}$ mA. Si $\mathbf{V} = 40\underline{/132°}$ mV: (*a*) ¿cuál es probablemente el tipo de elemento conectado a la derecha de la resistencia de 10 Ω y (*b*) ¿cuál es su valor, suponiendo que la fuente de tensión opera a una frecuencia de 1 000 rad/s?



■ **FIGURA 10.53**

35. El circuito de la figura 10.53 se muestra representado en el dominio fasorial (de frecuencia). Si $\mathbf{I}_{10} = 4\underline{/35°}$ A, $\mathbf{V} = 10\underline{/35°}$ e $\mathbf{I} = 2\underline{/35°}$ A, (*a*) qué tipo de elemento corresponde a la tensión **V**, y cuál es su valor? (*b*) Determine el valor de $\mathbf{V}_s$.

10.5 Impedancia y admitancia

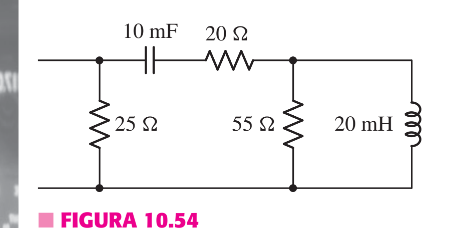


36. (*a*) Obtenga una expresión para la impedancia equivalente $\mathbf{Z}_{eq}$ de una resistencia de 1 Ω en serie con un inductor de 10 mH como una función de ω. (*b*) Grafique la magnitud de $\mathbf{Z}_{eq}$ como una función de ω dentro del intervalo $1 < \omega < 100$ krad/s (use una escala logarítmica para el eje de frecuencia). (*c*) Grafique el ángulo (en grados) de $\mathbf{Z}_{eq}$ como una función de ω dentro del intervalo $1 < \omega < 100$ krad/s (use una escala logarítmica para el eje de frecuencia). [*Pista: semilogx*() de MATLAB es una útil función de graficación.]

37. Determine la impedancia equivalente de las siguientes opciones, suponiendo una frecuencia de operación de 20 rad/s: (*a*) 1 kΩ en serie con 1 mF; (*b*) 1 kΩ en paralelo con 1 mH; (*c*) 1 kΩ en paralelo con una combinación en serie de 1 F y 1 H.



38. (*a*) Obtenga una expresión para la impedancia equivalente $\mathbf{Z}_{eq}$ de una resistencia de 1 Ω en serie con un capacitor de 10 mF como una función de ω. (*b*) Grafique la magnitud de $\mathbf{Z}_{eq}$ como una función de ω en el intervalo $1 < \omega < 100$ krad/s (use escala logarítmica para el eje de frecuencia). (*c*) Grafique el ángulo (en grados) de $\mathbf{Z}_{eq}$ como una función de ω en el intervalo $1 < \omega < 100$ krad/s (use escala logarítmica para el eje de frecuencia). [*Pista*: *semilogx*() de MATLAB es una función útil de graficación.]



■ **FIGURA 10.54**

39. Determine la admitancia equivalente de las siguientes opciones, suponiendo una frecuencia de operación de 1 000 rad/s: (*a*) 25 Ω en serie con 20 mH; (*b*) 25 Ω en paralelo con 20 mH; (*c*) 25 Ω en paralelo con 20 mH en paralelo con 20 mF; (*d*) 1 Ω en serie con 1 F en serie con 1 H; (*e*) 1 Ω en paralelo con 1 F en paralelo con 1 H.

40. Considere la red representada en la figura 10.54 y determine la impedancia equivalente vista desde las terminales a circuito abierto si (*a*) $\omega = 1$ rad/s; (*b*) $\omega = 10$ rad/s; (*c*) $\omega = 100$ rad/s.

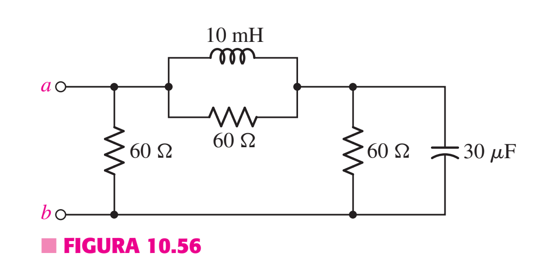
41. Intercambie el capacitor y el inductor en la red que se muestra en la figura 10.54 y calcule la impedancia equivalente vista desde las terminales a circuito abierto si $\omega = 25$ rad/s.

42. Encuentre **V** en la figura 10.55 si la caja contiene (*a*) 3 Ω en serie con 2 mH; (*b*) 3 Ω en serie con 125 μF; (*c*) 3 Ω, 2 mH y 125 μF en serie; (*d*) 3 Ω, 2 mH y 125 μF en serie, pero $\omega = 4$ krad/s.

$3\underline{/-20°}$ A
$\omega = 2$ krad/s
+ V −

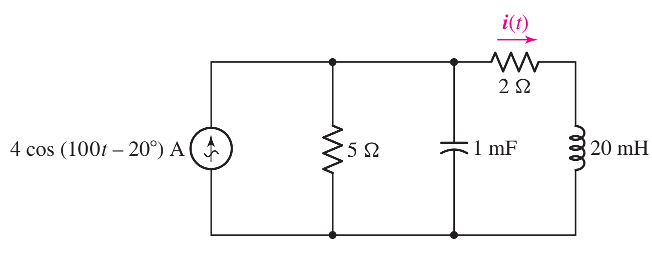
■ **FIGURA 10.55**

43. Calcule la impedancia equivalente vista desde las terminales a circuito abierto que se muestra en la figura 10.56 si *f* es igual a (*a*) 1 Hz; (*b*) 1 kHz; (*c*) 1 MHz; (*d*) 1 GHz; (*e*) 1 THz.



■ **FIGURA 10.56**

44. Use el análisis fasorial para obtener una expresión para $i(t)$ en el circuito de la figura 10.57.



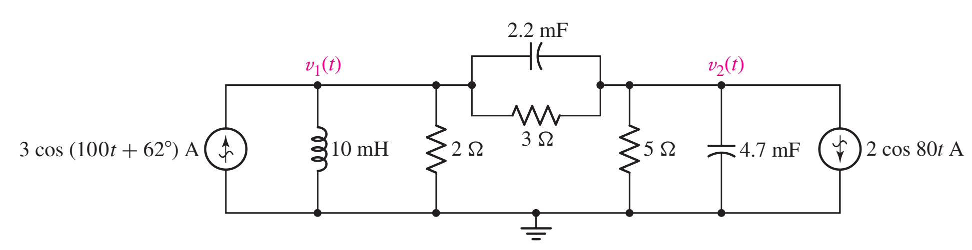
■ **FIGURA 10.57**


45. Diseñe una combinación adecuada de resistencias, capacitores y/o inductores que tenga una impedancia equivalente a $\omega = 100$ rad/s de (*a*) 1 Ω usando por lo menos un inductor; (*b*) $7\underline{/10^\circ}$ Ω; (*c*) $3 - j4$ Ω.


46. Diseñe una combinación adecuada de resistencias, capacitores y/o inductores que tenga una admitancia equivalente a $\omega = 10$ rad/s de (*a*) 1 S usando por lo menos un capacitor; (*b*) $12\underline{/-18^\circ}$ S; (*c*) $2 + j$ mS.

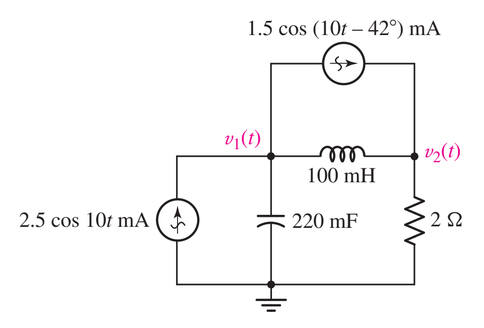
10.6 Análisis nodal y de malla

47. Para el circuito que se representa en la figura 10.58, (*a*) vuelva a dibujar con los fasores adecuados y las impedancias marcadas; (*b*) use análisis nodal para determinar las dos tensiones de nodo $v_1(t)$ y $v_2(t)$.



■ **FIGURA 10.58**

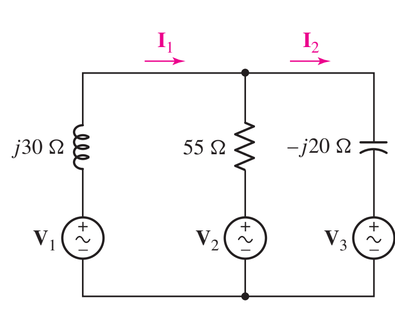
48. Para el circuito que se ilustra en la figura 10.59, (*a*) vuelva a dibujarlo, identificando las cantidades fasoriales y de impedancia adecuadas; (*b*) determine expresiones para las tres corrientes de malla en dominio de tiempo.



■ **FIGURA 10.59**

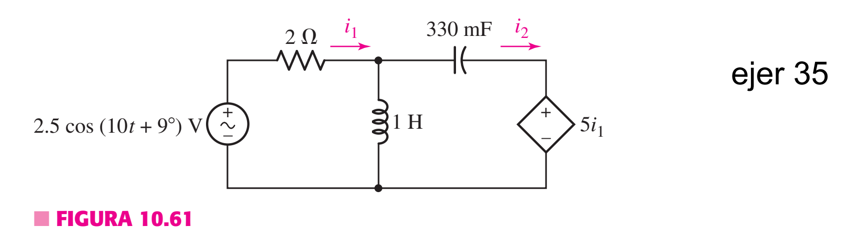
49. Con referencia al circuito de la figura 10.59, utilice técnicas de análisis fasorial para determinar las dos tensiones de nodo.

50. En el circuito en el dominio fasorial representado en la figura 10.60, sea $\mathbf{V}_1 = 10\underline{/-80^\circ}$ V, $\mathbf{V}_2 = 4\underline{/-20^\circ}$ y $\mathbf{V}_3 = 2\underline{/-23^\circ}$ **V**. Calcule $\mathbf{I}_1$ e $\mathbf{I}_2$.



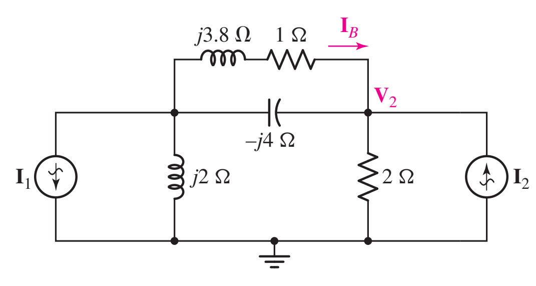
■ **FIGURA 10.60**

51. Con referencia al circuito de dos mallas en el dominio fasorial representado en la figura 10.60, calcule la relación $\mathbf{I}_1$ a $\mathbf{I}_2$ si $\mathbf{V}_1 = 3\underline{/0°}$ V, $\mathbf{V}_2 = 5.5\underline{/-130°}$ V y $\mathbf{V}_3 = 1.5\underline{/17°}$ V.
52. Utilice las técnicas de análisis fasorial para obtener expresiones para las dos corrientes de malla i_1 e i_2 como se muestra en la figura 10.61.



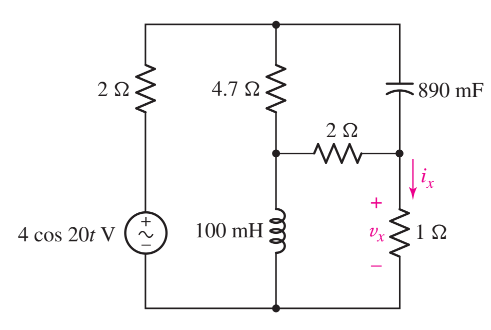
■ FIGURA 10.61

53. Determine $\mathbf{I}_B$ en el circuito de la figura 10.62 si $\mathbf{I}_1 = 5\underline{/-18°}$ A e $\mathbf{I}_2 = 2\underline{/5°}$ A.



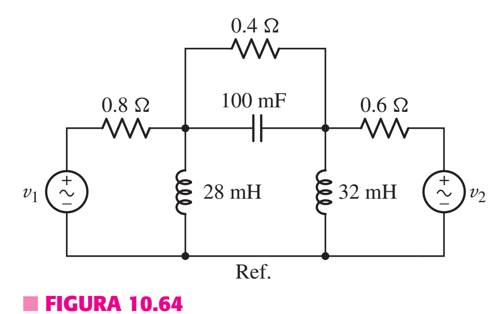
■ FIGURA 10.62

54. Determine $\mathbf{V}_2$ en el circuito de la figura 10.62 si $\mathbf{I}_1 = 15\underline{/0°}$ e $\mathbf{I}_2 = 25\underline{/131°}$ A.
55. Utilice el análisis fasorial para obtener una expresión para v_x marcada en el circuito de la figura 10.63.



■ FIGURA 10.63

56. Determine la corriente i_x en el circuito de la figura 10.63.
57. Obtenga una expresión para cada una de las cuatro corrientes de malla (en sentido horario) para el circuito de la figura 10.64 si $v_1 = 133 \cos(14t + 77°)$ V y $v_2 = 55 \cos(14t + 22°)$ V.

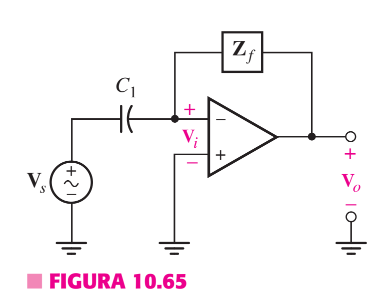


■ FIGURA 10.64

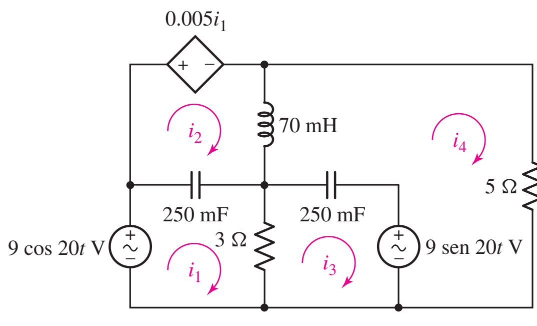
58. Determine las tensiones de nodo para el circuito de la figura 10.64, usando el nodo inferior como nodo de referencia, si $v_1 = 0.009 \cos(500t + 0.5°)$ V y $v_2 = 0.004 \cos(500t + 1.5°)$ V.

59. El amp op que se presenta en la figura 10.65 tiene una impedancia de entrada infinita, impedancia de salida cero y una ganancia grande pero finita (positiva, real) $A = -\mathbf{V}_o/\mathbf{V}_i$. (*a*) Construya un diferenciador básico poniendo $\mathbf{Z}_f = R_f$, determine $\mathbf{V}_o/\mathbf{V}_s$ y luego muestre que $\mathbf{V}_o/\mathbf{V}_s \to -j\omega C_1 R_f$ conforme $\mathbf{A} \to \infty$. (*a*) Sea $\mathbf{Z}_f$ el representante de C_f y R_f estando en paralelo, determine $\mathbf{V}_o/\mathbf{V}_s$ y luego muestre que $\mathbf{V}_o/\mathbf{V}_s \to -j\omega C_1 R_f/(1 + j\omega C_f R_f)$ conforme $\mathbf{A} \to \infty$.

60. Obtenga una expresión para cada una de las cuatro corrientes de malla identificadas en el circuito de la figura 10.66.



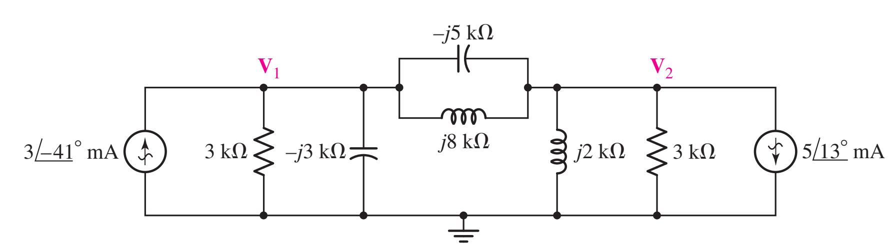
■ FIGURA 10.65



■ FIGURA 10.66

10.7 Superposición, transformaciones de fuente y teorema de Thévenin

61. Determine la contribución individual de cada fuente de corriente a las dos tensiones de nodo $\mathbf{V}_1$ y $\mathbf{V}_2$ representadas en la figura 10.67.

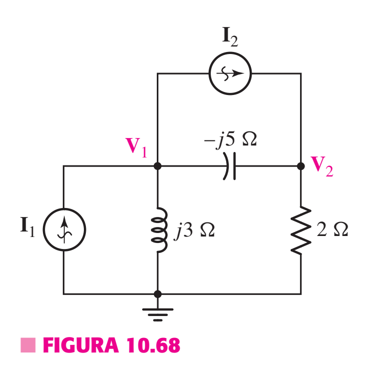


■ FIGURA 10.67

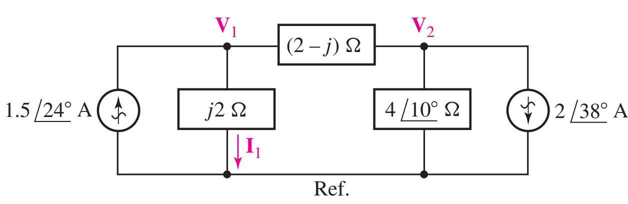
62. Determine $\mathbf{V}_1$ y $\mathbf{V}_2$ en la figura 10.68 si $\mathbf{I}_1 = 33\angle 3°$ mA e $\mathbf{I}_2 = 51\angle -91°$ mA.

63. El circuito en el dominio fasorial de la figura 10.68 se dibujó suponiendo una frecuencia de operación de 2.5 rad/s. Por desgracia, la unidad de fabricación instaló equivocadamente las fuentes, cada una operando a diferente frecuencia. Si $i_1(t) = 4 \cos 40t$ mA e $i_2(t) = 4$ sen $30t$ mA, calcule $v_1(t)$ y $v_2(t)$.

64. Obtenga el equivalente de Thévenin visto desde la impedancia de $(2 - j)$ Ω de la figura 10.69 y utilícelo para determinar la corriente $\mathbf{I}_1$.



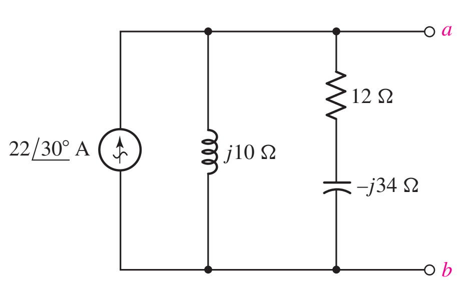
■ FIGURA 10.68



■ FIGURA 10.69

65. La impedancia de $(2 - j)\ \Omega$ en el circuito de la figura 10.69 se reemplaza por una impedancia de $(1 + j)\ \Omega$. Realice una transformación de fuente en cada fuente, simplifique el circuito resultante tanto como sea posible y calcule la corriente que fluye a través de la impedancia $(1 + j)\ \Omega$.

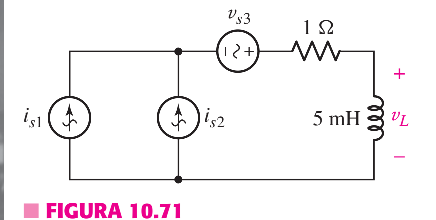
66. Respecto al circuito representado en la figura 10.70, (*a*) calcule el equivalente de Thévenin visto desde las terminales marcadas *a* y *b*; (*b*) determine el equivalente de Norton visto desde las terminales marcadas *a* y *b*; (*c*) calcule la corriente que fluye de *a* a *b* si una impedancia de $(7 - j2)\ \Omega$ está conectada entre dichas terminales.



■ **FIGURA 10.70**

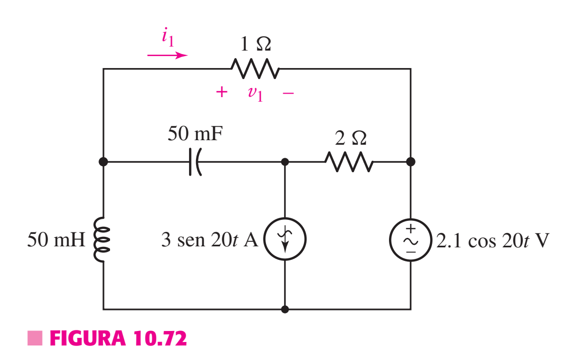


67. En el circuito de la figura 10.71, $i_{s1} = 8 \cos (4t - 9°)$ mA, $i_{s2} = 5 \cos 4t$ y $v_{s3} = 2 \text{ sen } 4t$. (*a*) Vuelva a dibujar el circuito en el dominio fasorial; (*b*) reduzca el circuito a una sola fuente de corriente con la ayuda de una transformación de fuente; (*c*) calcule $v_L(t)$. (*d*) Verifique su solución con una simulación adecuada en PSpice.



■ **FIGURA 10.71**

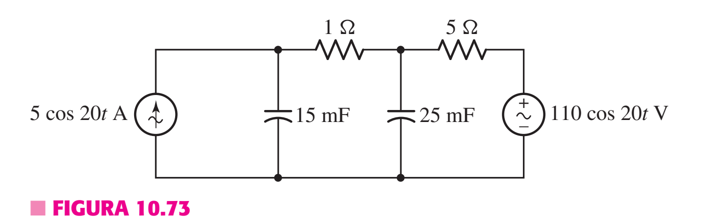
68. Determine la contribución individual de cada fuente en la figura 10.72 a la tensión $v_1(t)$.



■ **FIGURA 10.72**



69. Determine la potencia disipada por la resistencia de 1 Ω en el circuito de la figura 10.73. Verifique su solución con una simulación adecuada en PSpice.



■ **FIGURA 10.73**

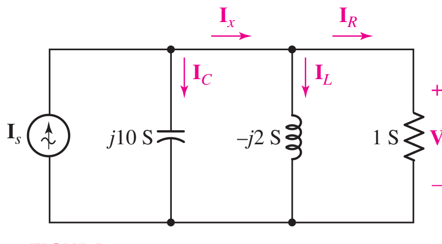
1 F
+ $\mathbf{V}_L$ −
2 H
a
1/0° V
$0.25\mathbf{V}_L$
b

■ **FIGURA 10.74**

70. Use $\omega = 1$ rad/s y encuentre el equivalente de Norton de la red que se muestra en la figura 10.74. Construya el equivalente de Norton como una fuente de corriente $\mathbf{I}_N$ en paralelo con una resistencia R_N y ya sea una inductancia L_N o una capacitancia C_N.

10.8 Diagramas fasoriales

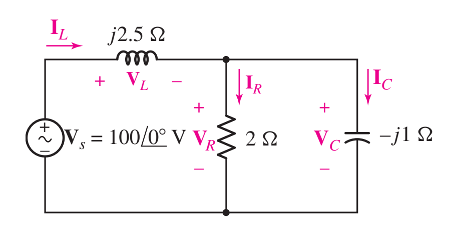
71. La fuente $\mathbf{I}_s$ en el circuito de la figura 10.75 se selecciona de tal modo que $\mathbf{V} = 5\angle 120°$ V. (*a*) Construya un diagrama fasorial que muestre $\mathbf{I}_R$, $\mathbf{I}_L$ e $\mathbf{I}_C$. (*b*) Use el diagrama para determinar el ángulo en el que $\mathbf{I}_s$ está en adelanto con respecto a $\mathbf{I}_R$, $\mathbf{I}_C$ e $\mathbf{I}_s$.



■ FIGURA 10.75

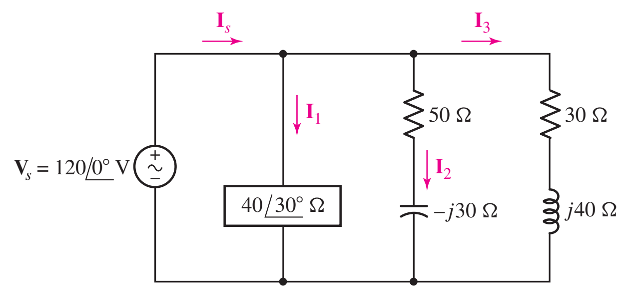
72. Sea $\mathbf{V}_1 = 100\angle 0°$ V, $|\mathbf{V}_2| = 140$ V y $|\mathbf{V}_1 + \mathbf{V}_2| = 120$ V. Utilice métodos gráficos para determinar dos valores posibles del ángulo de $\mathbf{V}_2$.

73. (*a*) Calcule los valores $\mathbf{I}_L$, $\mathbf{I}_R$, $\mathbf{I}_C$, $\mathbf{V}_L$, $\mathbf{V}_R$ y $\mathbf{V}_C$, para el circuito de la figura 10.76. (*b*) Utilizando escalas de 50 V correspondiente a 1 pulgada y 25 A a 1 pulgada, muestre las siete cantidades sobre un diagrama fasorial e indique que $\mathbf{I}_L = \mathbf{I}_R + \mathbf{I}_C$ y $\mathbf{V}_s = \mathbf{V}_L + \mathbf{V}_R$.



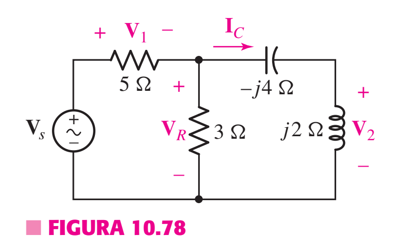
■ FIGURA 10.76

74. En el circuito de la figura 10.77, (*a*) calcule los valores de $\mathbf{I}_1$, $\mathbf{I}_2$ e $\mathbf{I}_3$. (*b*) Muestre $\mathbf{V}_s$, $\mathbf{I}_1$, $\mathbf{I}_2$ e $\mathbf{I}_3$ sobre un diagrama fasorial (las escalas de 50 V/pulgada y 2 A/pulgada funcionan bien). (*c*) Determine gráficamente $\mathbf{I}_s$ e indique su amplitud y su ángulo de fase.



■ FIGURA 10.77

75. La fuente de tensión $\mathbf{V}_s$ en la figura 10.78 se elige de tal manera que $\mathbf{I}_C = 1\angle 0°$ A. (*a*) Dibuje un diagrama fasorial que muestre $\mathbf{V}_1$, $\mathbf{V}_2$, $\mathbf{V}_s$ y $\mathbf{V}_R$. (*b*) Use el diagrama para determinar la relación de $\mathbf{V}_2$ a $\mathbf{V}_1$.

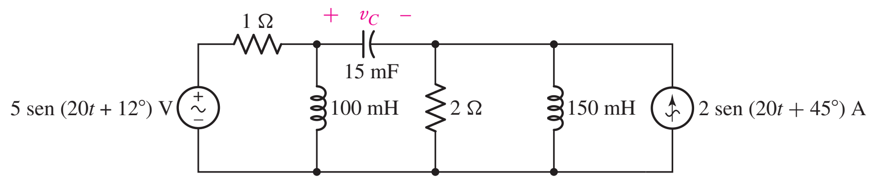


■ FIGURA 10.78

Ejercicios de integración de capítulo



76. Para el circuito que se muestra en la figura 10.79, (*a*) dibuje la representación fasorial del circuito; (*b*) determine el equivalente de Thévenin por el capacitor y úselo para calcular $v_C(t)$. (*c*) Determine la corriente que sale de la terminal de referencia positiva de la fuente de tensión. (*d*) Verifique su solución mediante una simulación adecuada en PSpice.

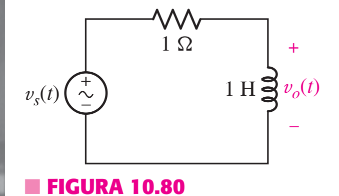


■ **FIGURA 10.79**

77. El circuito de la figura 10.79 opera desafortunadamente en forma diferente a la especificada; la frecuencia en la fuente de corriente es de sólo 19 rad/s. Calcule la tensión real del capacitor y compárelo con la tensión esperada si el circuito hubiera estado trabajando correctamente.

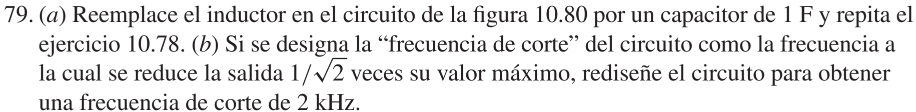


78. Para el circuito que se muestra en la figura 10.80, (*a*) dibuje la representación fasorial correspondiente; (*b*) obtenga una expresión para $\mathbf{V}_o/\mathbf{V}_s$; (*c*) grafique $|\mathbf{V}_o/\mathbf{V}_s|$, la magnitud de la relación de las tensiones fasoriales, como una función de la frecuencia ω dentro del intervalo $0.01 \leq \omega \leq 100$ rad/s (use un eje *x* logarítmico). (*d*) ¿El circuito transfiere bajas frecuencias o altas frecuencias más eficazmente a la salida?



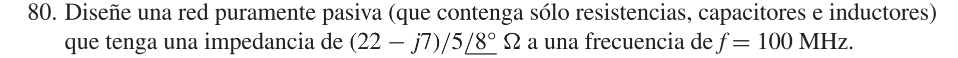
■ **FIGURA 10.80**





79. (*a*) Reemplace el inductor en el circuito de la figura 10.80 por un capacitor de 1 F y repita el ejercicio 10.78. (*b*) Si se designa la "frecuencia de corte" del circuito como la frecuencia a la cual se reduce la salida $1/\sqrt{2}$ veces su valor máximo, rediseñe el circuito para obtener una frecuencia de corte de 2 kHz.

DP



80. Diseñe una red puramente pasiva (que contenga sólo resistencias, capacitores e inductores) que tenga una impedancia de $(22 - j7)/5\underline{/8°}$ Ω a una frecuencia de $f = 100$ MHz.

LECTURAS ADICIONALES

Se puede encontrar un panorama muy completo de los conceptos de la potencia de ca en el capítulo 2 de:

B. M. Weedy, *Electric Power Systems*, 3a. ed. Chichester, England: Wiley, 1984.

Temas contemporáneos relativos a los sistemas de potencia de ca se pueden encontrar en:

International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Guildford, England: IPC Science and Technology Press, 1979-. ISSN: 0142-0615.

EJERCICIOS

11.1 Potencia instantánea

1. Determine la potencia instantánea suministrada a la resistencia de 1 Ω de la figura 11.23 en $t = 0$, $t = 1$ s y $t = 2$ s si v_s es igual a (*a*) 9 V; (*b*) 9 sen $2t$ V; (*c*) 9 sen $(2t + 13°)$ V; (*d*) $9e^{-t}$ V.
2. Determine la potencia absorbida en $t = 1.5$ ms por cada uno de los tres elementos del circuito que se muestra en la figura 11.24 si v_s es igual a (*a*) $30u(-t)$ V; (*b*) $10 + 20u(t)$ V.
3. Calcule la potencia absorbida en $t = 0^-$, $t = 0^+$ y $t = 200$ ms por cada uno de los elementos del circuito de la figura 11.25 si v_s es igual a (*a*) $-10u(-t)$ V; (*b*) $20 + 5u(t)$ V.

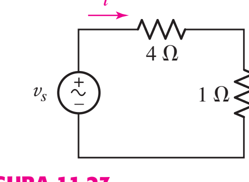


FIGURA 11.23

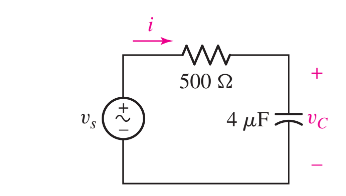


FIGURA 11.24

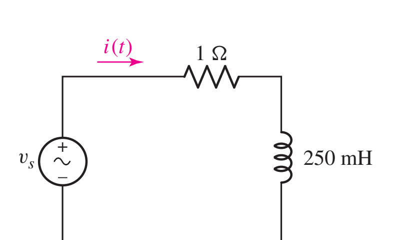


FIGURA 11.25

4. Tres elementos están conectados en paralelo: una resistencia de 1 kΩ, un inductor de 15 mH y una fuente senoidal de 100 cos $(2 \times 10^5 t)$ mA. Todos los transitorios han desaparecido desde hace tiempo, de modo que el circuito está operando en estado estable. Determine la potencia que está absorbiendo cada elemento en $t = 10$ μs.
5. Sea $i_s = 4u(-t)$ A en el circuito de la figura 11.26. (*a*) Demuestre que, para todo $t > 0$, la potencia instantánea absorbida por la resistencia es de igual magnitud pero de signo contrario que la potencia instantánea absorbida por el capacitor. (*b*) Determine la potencia absorbida por la resistencia en $t = 60$ ms.
6. La fuente de corriente en el circuito de la figura 11.26 está dada por $i_s = 8 - 7u(t)$ A. Calcule la potencia absorbida por los tres elementos en $t = 0^-$, $t = 0^+$ y $t = 75$ ms.
7. Suponiendo que no hay transitorios presentes, calcule la potencia absorbida por cada uno de los elementos que se muestran en la figura 11.27 en $t = 0$, 10 y 20 ms.

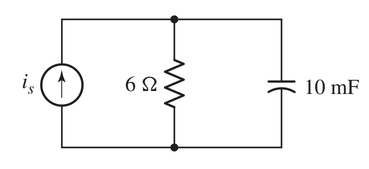


FIGURA 11.26

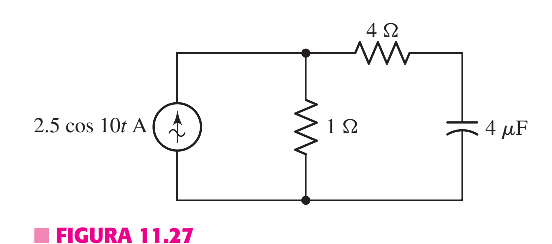
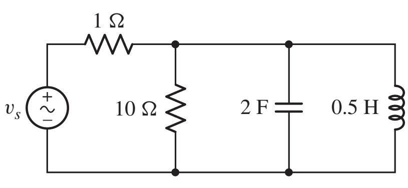


FIGURA 11.27



■ FIGURA 11.28

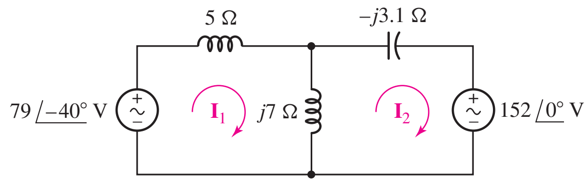
8. Calcule en la figura 11.28 la potencia absorbida por el inductor en $t = 0$ y $t = 1$ s si $v_s = 10u(t)$ V.
9. Un capacitor de 100 mF almacena una energía de 100 mJ hasta el punto en el que un conductor con una resistencia de 1.2 Ω se presenta en sus terminales. ¿Cuál es la potencia instantánea disipada en el conductor en $t = 120$ ms? Si la capacidad de calor específico[3] del conductor es de 0.9 kJ/kg · K y su masa es de 1 g, estime el incremento de temperatura del conductor en el primer segundo a partir de que el capacitor se descarga suponiendo que ambos elementos se encuentran inicialmente a 23°C.
10. Si hacemos que un típico rayo que cae desde una nube hasta la tierra represente una corriente de 30 kA en un intervalo de 150 μs, calcule (*a*) la potencia instantánea entregada a la varilla de cobre, la cual tiene una resistencia de 1.2 mΩ en el momento en el que cae el rayo; y (*b*) la energía total entregada a la varilla.

11.2 Potencia promedio (activa)

11. La corriente fasorial $\mathbf{I} = 9\underline{/15°}$ mA (correspondiente a una senoide que opera a 45 rad/s) se aplica a la conexión en serie de una resistencia de 18 kΩ y un capacitor de 1μF. Obtenga una expresión para (*a*) la potencia instantánea y (*b*) la potencia promedio absorbida por la carga combinada.



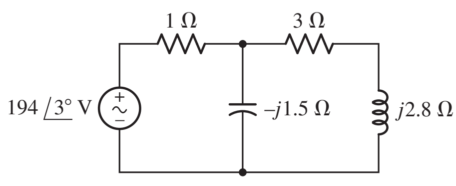
12. Una tensión fasorial $\mathbf{V} = 100\underline{/45°}$ V (la senoide opera a 155 rad/s) se aplica a la conexión en paralelo de una resistencia de 1 Ω y un inductor de 1 mH. (*a*) Obtenga una expresión para la potencia promedio absorbida por cada elemento pasivo. (*b*) Grafique la potencia instantánea suministrada a la conexión en paralelo, junto con la potencia instantánea absorbida individualmente por cada elemento. (Use una sola gráfica.)
13. Calcule la potencia promedio suministrada por la corriente $4 - j2$ A a (*a*) $\mathbf{Z} = 9$ Ω; (*b*) $\mathbf{Z} = -j1\,000$ Ω; (*c*) $\mathbf{Z} = 1 - j2 + j3$ Ω; (*d*) $\mathbf{Z} = 6\underline{/32°}$; (*e*) $\mathbf{Z} = \dfrac{1.5\underline{/-19°}}{2+j}$ kΩ.
14. Con referencia al circuito de dos mallas representado en la figura 11.29, determine la potencia promedio absorbida por cada elemento pasivo y la potencia promedio suministrada por cada fuente, y verifique que la potencia promedio total suministrada = potencia promedio total absorbida.



■ FIGURA 11.29



15. (*a*) Calcule la potencia promedio absorbida por cada elemento pasivo en el circuito de la figura 11.30, y verifique que sea igual a la potencia promedio suministrada por la fuente. (*b*) Verifique su solución con una simulación PSpice adecuada.



■ FIGURA 11.30

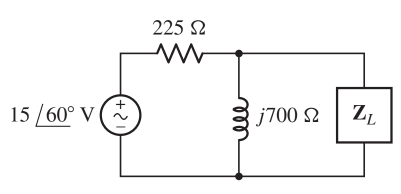
[3] Suponga que el calor específico c está dado por $c = Q/m \cdot \Delta T$, donde Q = la energía entregada al conductor, m es la masa y ΔT es el incremento de temperatura.



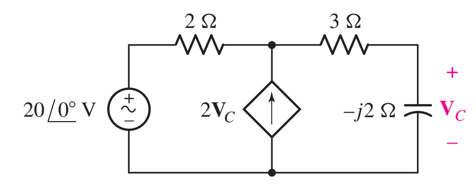
16. (*a*) ¿Qué impedancia de carga $\mathbf{Z}_L$ tomará la máxima potencia promedio de la fuente que se muestra en la figura 11.31? (*b*) Calcule la potencia promedio máxima suministrada a la carga.

17. La inductancia de la figura 11.31 se reemplaza por la impedancia 9 − *j*8 kΩ. Repita el ejercicio 16.

18. Determine la potencia promedio suministrada por la fuente dependiente en el circuito de la figura 11.32.



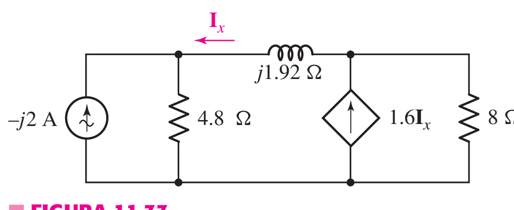
■ **FIGURA 11.31**



■ **FIGURA 11.32**

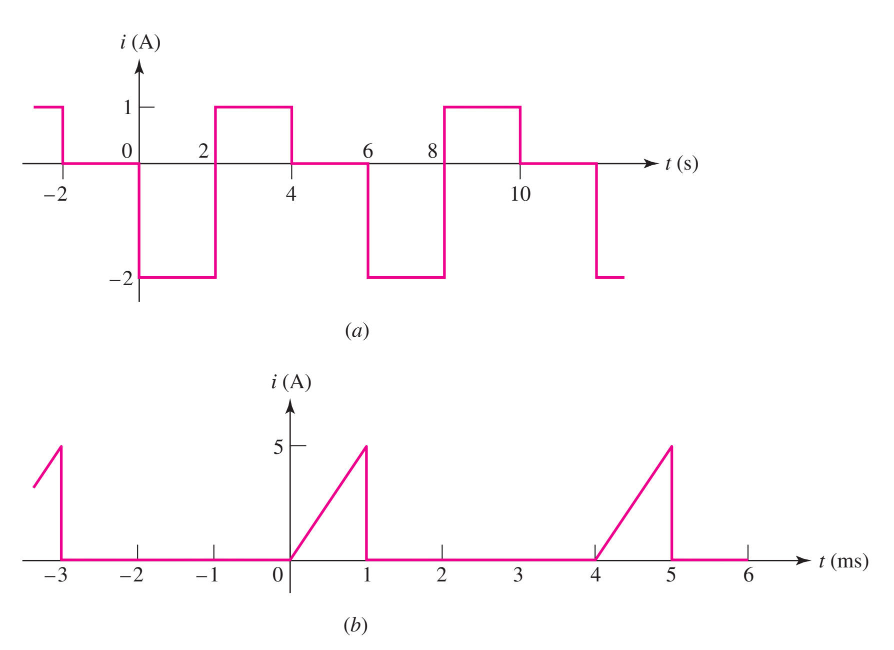


19. (*a*) Calcule la potencia promedio suministrada a cada elemento pasivo en el circuito de la figura 11.33. (*b*) Determine la potencia suministrada por cada fuente. (*c*) Reemplace la carga resistiva de 8 Ω con una impedancia capaz de tomar máxima potencia promedio del resto del circuito. (*d*) Verifique su solución mediante una simulación PSpice.



■ **FIGURA 11.33**

20. (*a*) Calcule el valor promedio de cada forma de onda que se muestra en la figura 11.34. (*b*) Eleve al cuadrado cada forma de onda y determine el valor promedio de cada nueva forma de onda periódica.

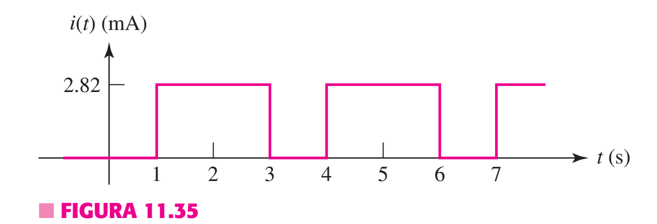


■ **FIGURA 11.34**

21. Calcule la potencia promedio suministrada a una carga de 2.2 Ω por la tensión v_s igual a (*a*) 5 V; (*b*) 4 cos 80*t* − 8 sen 80*t* V; (*c*) 10 cos 100*t* + 12.5 cos (100*t* + 19) V.

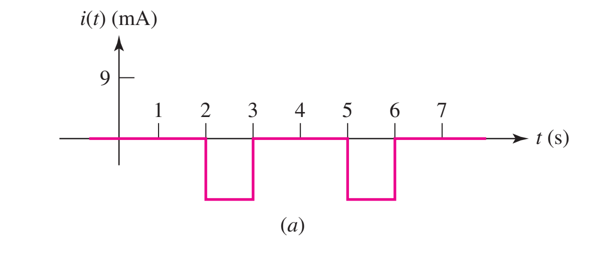
11.3 Valores eficaces de corriente y de tensión

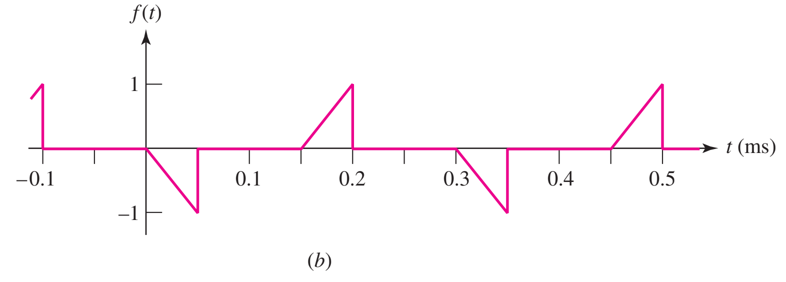
22. Calcule el valor eficaz de las siguientes formas de onda: (*a*) 7 sen 30*t* V; (*b*) 100 cos 80*t* mA; (*c*) $120\sqrt{2}$ cos (5 000*t* − 45°) V; (*d*) $\frac{100}{\sqrt{2}}$ sen (2*t* + 72°) A.
23. Determine el valor eficaz de las siguientes formas de onda: (*a*) 62.5 cos 100*t* mV; (*b*) 1.95 cos 2*t* A; (*c*) $208\sqrt{2}$ cos (100π*t* + 29°) V; (*d*) $\frac{400}{\sqrt{2}}$ sen (2 000*t* − 14°) A.
24. Calcule el valor eficaz de (*a*) *i*(*t*) = 3 sen 4*t* A; (*b*) *v*(*t*) = 4 sen 20*t* cos 10*t*; (*c*) *i*(*t*) = 2 − sen 10*t* mA; (*d*) la forma de onda graficada en la figura 11.35.



■ **FIGURA 11.35**

25. Para cada forma de onda graficada en la figura 11.34, determine su frecuencia, su periodo y su valor rms.
26. Determine tanto el valor promedio como el rms de cada forma de onda representada en la figura 11.36.



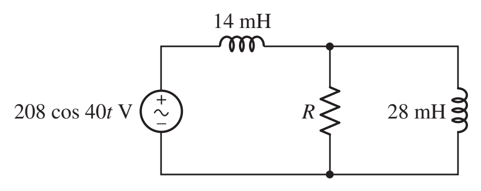


■ **FIGURA 11.36**

27. La combinación en serie de una resistencia de 1 kΩ y de un inductor de 2 H no debe disipar más de 250 mW de potencia en cualquier instante. Suponiendo una corriente senoidal con ω = 500 rad/s, ¿cuál es la corriente rms más grande que puede tolerarse?



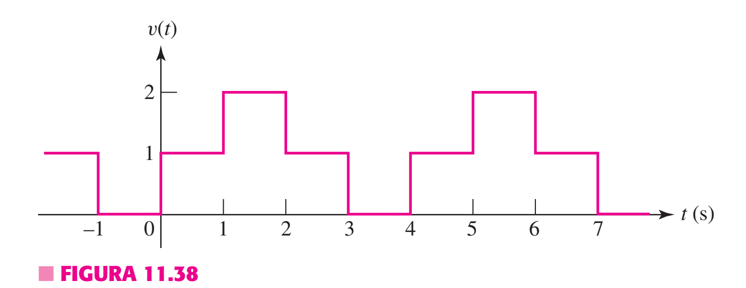
28. Para cada una de las siguientes formas de onda, determine su periodo, su frecuencia y su valor eficaz; (*a*) 5 V; (*b*) 2 sen 80*t* − 7 cos 20*t* + 5 V; (*c*) 5 cos 50*t* + 3 sen 50*t* V; (*d*) 8 $\cos^2$ 90*t* mA. (*e*) Verifique sus respuestas con la simulación adecuada.
29. Con referencia al circuito de la figura 11.37, determine si un valor puramente real de *R* puede dar por resultado tensiones rms iguales entre las terminales del inductor de 14 mH y la resistencia *R*. Si es así, calcule *R* y la tensión rms entre sus terminales; si no, explique por qué no.



■ **FIGURA 11.37**



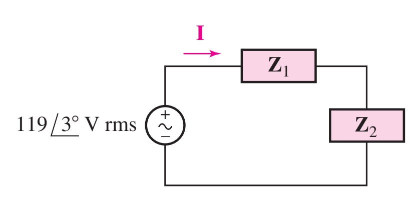
30. (*a*) Calcule los valores tanto promedio como rms de la forma de onda graficada en la figura 11.38. (*b*) Verifique sus soluciones mediante una simulación PSpice adecuada. (*Pista:* Usted puede querer emplear dos formas de onda pulsantes sumadas).



■ **FIGURA 11.38**

11.4 Potencia aparente y factor de potencia

31. Para el circuito de la figura 11.39, calcule la potencia promedio suministrada a cada carga, la potencia aparente suministrada por la fuente y el factor de potencia de la carga combinada si (*a*) $\mathbf{Z}_1 = 14\underline{/32^\circ}\ \Omega$ y $\mathbf{Z}_2 = 22\ \Omega$; (*b*) $\mathbf{Z}_1 = 2\underline{/0^\circ}\ \Omega$ y $\mathbf{Z}_2 = 6 - j\ \Omega$; (*c*) $\mathbf{Z}_1 = 100\underline{/70^\circ}\ \Omega$ y $\mathbf{Z}_2 = 75\underline{/90^\circ}\ \Omega$.



■ **FIGURA 11.39**

32. Calcule el factor de potencia de las cargas combinadas del circuito representado en la figura 11.39 si (*a*) ambas cargas son puramente resistivas; (*b*) ambas cargas son puramente inductivas y $\omega = 100$ rad/s; (*c*) ambas cargas son puramente capacitivas y $\omega = 200$ rad/s; (*d*) $\mathbf{Z}_1 = 2\mathbf{Z}_2 = 5 - j8\ \Omega$.

33. Una carga dada está conectada a un sistema de potencia ca. Si se sabe que la carga se caracteriza por pérdidas resistivas y ya sea por capacitivas, inductivas o ninguna (pero no ambas), ¿qué tipo de elemento reactivo es parte de la carga si el factor de potencia se mide como (*a*) la unidad; (*b*) 0.85 en retraso; (*c*) 0.221 en adelanto; (*d*) cos (−90°)?

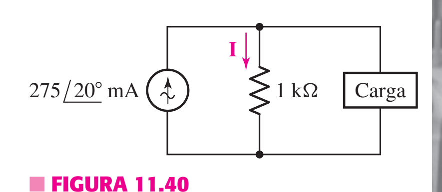
34. Una carga desconocida está conectada a una salida doméstica estándar europea (240 V rms, 50 Hz). Determine la diferencia de ángulo de fase entre la tensión y la corriente, y si la tensión adelanta o atrasa con respecto a la corriente si (*a*) $\mathbf{V} = 240\underline{/243^\circ}$ V rms e $\mathbf{I} = 3\underline{/9^\circ}$ A rms; (*b*) el factor de potencia de la carga es 0.55 en retraso; (*c*) el factor de potencia de la carga es 0.685 atrasado; (*d*) la carga capacitiva toma 100 W de potencia promedio y 500 volt-amperes de potencia aparente.



35. (*a*) Diseñe una carga que tome una potencia promedio de 25 W con un FP adelantado de 0.88 de una toma doméstica estándar norteamericana (120 V rms, 60 Hz). (*b*) Diseñe una carga sin capacitores que tome una potencia promedio de 150 W y una potencia aparente de 25 W de una salida doméstica en el este de Japón (110 V rms, 50 Hz).

36. Suponiendo una frecuencia de operación de 40 rad/s para el circuito que se muestra en la figura 11.40 y una impedancia de carga de $50\underline{/-100^\circ}\ \Omega$, calcule (*a*) la potencia instantánea suministrada individualmente a la carga y a la resistencia en puente de 1 kΩ en $t = 20$ ms; (*b*) la potencia promedio suministrada tanto a ambos elementos pasivos; (*c*) la potencia aparente suministrada a la carga; (*d*) el factor de potencia al cual opera la fuente.

37. Calcule el factor de potencia al que opera la fuente de la figura 11.40 si la carga es (*a*) puramente resistiva; (*b*) $1\,000 + j900\ \Omega$; (*c*) $500\underline{/-5^\circ}\ \Omega$.



■ **FIGURA 11.40**

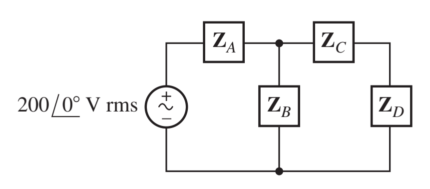


FIGURA 11.41

38. Determine la impedancia de carga para el circuito representado en la figura 11.40 si la fuente opera a un FP de (*a*) 0.95 adelantado; (*b*) unidad; (*c*) 0.45 atrasado.

39. Para el circuito de la figura 11.41, encuentre la potencia aparente suministrada a cada carga y el factor de potencia al que opera la fuente, si (*a*) $\mathbf{Z}_A = 5 - j2\ \Omega$, $\mathbf{Z}_B = 3\ \Omega$, $\mathbf{Z}_C = 8 + j4\ \Omega$, y $\mathbf{Z}_D = 15\underline{/-30°}\ \Omega$; (*b*) $\mathbf{Z}_A = 2\underline{/-15°}\ \Omega$, $\mathbf{Z}_B = 1\ \Omega$, $\mathbf{Z}_C = 2 + j\Omega$ y $\mathbf{Z}_D = 4\underline{/45°}\ \Omega$.

11.5 Potencia compleja

40. Calcule la potencia compleja **S** (en forma polar) que toma cierta carga, si se sabe que (*a*) toma 100 W de potencia promedio con un FP de 0.75 atrasado; (*b*) toma una corriente de $\mathbf{I} = 9 + j5$ A rms cuando se conecta a la tensión $120\underline{/32°}$ V rms; (*c*) toma 1 000 W de potencia promedio y 10 VAR de potencia reactiva con un FP adelantado; (*d*) toma una potencia aparente de 450 W con un FP de 0.65 atrasado.

41. Calcule la potencia aparente, el factor de potencia y la potencia reactiva correspondientes a una carga si demanda potencia compleja **S** igual a (*a*) $1 + j0.5$ kVA; (*b*) 400 VA; (*c*) $150\underline{/-21°}$ VA; (*d*) $75\underline{/25°}$ VA.

42. Para cada triángulo de potencia representado en la figura 11.42, determine **S** (en forma polar) y el FP.

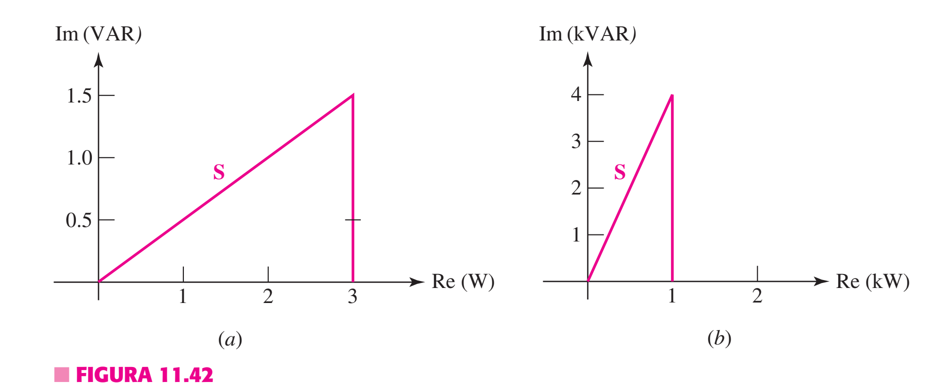


FIGURA 11.42

43. Con referencia a la red representada en la figura 11.21, si el motor toma una potencia compleja de $150\underline{/24°}$ VA, (*a*) determine el FP con el que opera la fuente; (*b*) determine la impedancia del dispositivo correctivo necesario para cambiar el FP de la fuente a 0.98 en atraso. (*c*) ¿Es físicamente posible obtener un FP adelantado para la fuente? *Explique*.

44. Determine la potencia compleja absorbida por cada componente pasivo en el circuito de la figura 11.43, y el factor de potencia con el que opera la fuente.

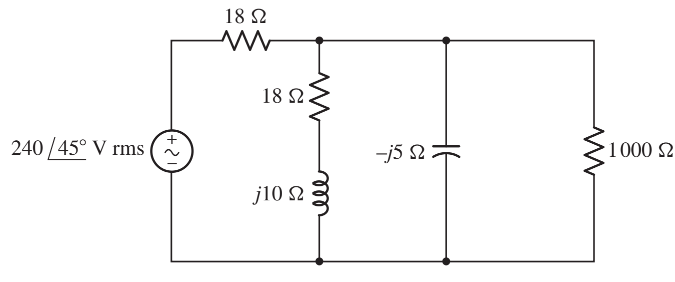
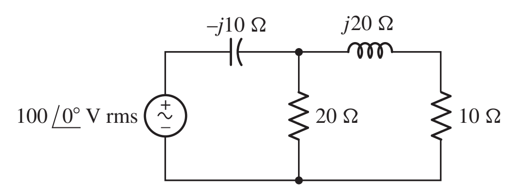


FIGURA 11.43

45. ¿Qué valor de capacitancia se debe agregar en paralelo a la resistencia de 10 Ω de la figura 11.44 para aumentar el FP de la fuente a 0.95 a 50 Hz?

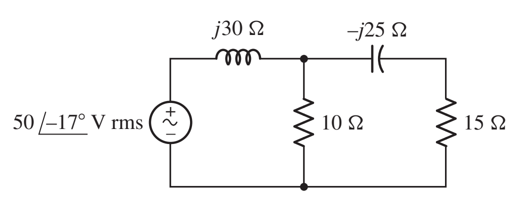


■ **FIGURA 11.44**



46. La operación del horno de secado de una maderería local tiene una demanda promedio mensual de potencia de 175 kW, pero asociada con esto, hay una toma promedio de potencia reactiva de 205 kVAR. Si la compañía de suministro eléctrico carga 0.15 dólares por kVAR por cada kVAR por encima del valor de referencia (0.7 por la demanda promedio pico), (*a*) estime el costo anual para la maderería por la multa por FP; (*b*) calcule el dinero ahorrado en el primero y en el segundo años, respectivamente, si hay disponibles para compra capacitores de compensación de 100 kVAR a 75 dólares cada uno (instalados).

47. Calcule la potencia compleja suministrada a cada componente pasivo del circuito que se muestra en la figura 11.45, y determine el factor de potencia de la fuente.



■ **FIGURA 11.45**

48. Reemplace la resistencia de 10 Ω en el circuito de la figura 11.45 por un inductor de 200 mH, suponga una frecuencia de operación de 10 rad/s y calcule (*a*) el FP de la fuente; (*b*) la potencia aparente suministrada por la fuente; (*c*) la potencia reactiva suministrada por la fuente.

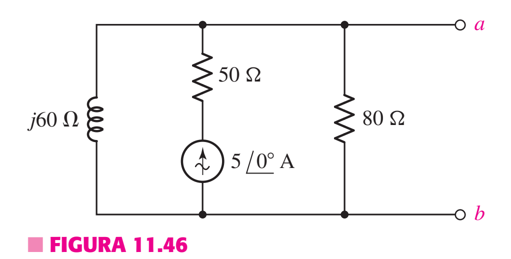
49. En vez de contener un capacitor como se indica en la figura 11.45, el circuito se construye erróneamente usando dos inductores idénticos, cada uno de los cuales con una impedancia de *j*30 Ω a la frecuencia de operación de 50 Hz. (*a*) Calcule la potencia compleja suministrada a cada componente pasivo. (*b*) Verifique su solución calculando la potencia compleja suministrada por la fuente. (*c*) ¿Con qué factor de potencia está operando la fuente?

50. Usando la estrategia general empleada en el ejemplo 11.9, deduzca la ecuación [28], que permite calcular el valor correctivo de la capacitancia para cualquier frecuencia general de operación.

Ejercicios de integración de capítulo

51. Una carga toma 10 A rms cuando se conecta a un suministro de 1 200 V rms a 50 Hz. Si la fuente opera a un FP de 0.9 atrasado, calcule (*a*) la magnitud de la tensión pico; (*b*) la potencia instantánea absorbida por la carga en $t = 1$ ms; (*c*) la potencia aparente suministrada por la fuente; (*d*) la potencia reactiva suministrada a la carga; (*e*) la impedancia de la carga, y (*f*) la potencia compleja suministrada por la carga (en forma polar).

52. Para el circuito de la figura 11.46, suponga que la fuente opera a una frecuencia de 100 rad/s. (*a*) Determine el FP al que opera la fuente. (*b*) Calcule la potencia aparente absorbida por cada uno de los tres elementos pasivos. (*c*) Calcule la potencia promedio suministrada por la fuente. (*d*) Determine el equivalente de Thévenin desde la perspectiva de las terminales marcadas *a* y *b*, y calcule la potencia promedio suministrada a una resistencia de 100 Ω conectado entre las mismas terminales.



■ FIGURA 11.46

53. Quite la resistencia de 50 Ω en la figura 11.46, suponga una frecuencia de operación de 50 Hz y (*a*) determine el factor de potencia al que opera la carga; (*b*) calcule la potencia promedio suministrada por la fuente; (*c*) calcule la potencia instantánea absorbida por la inductancia en $t = 2$ ms; (*d*) determine la capacitancia que se debe conectar entre las terminales marcadas *a* y *b* para aumentar el FP de la fuente a 0.95.

54. Una fuente de 45 sen 32*t* V se conecta en serie con una resistencia de 5 Ω y un inductor de 20 mH. Calcule (*a*) la potencia reactiva suministrada por la fuente; (*b*) la potencia aparente absorbida por cada uno de los tres elementos; (*c*) la potencia compleja **S** absorbida por cada elemento; (*d*) el factor de potencia con el que opera la fuente.

55. Para el circuito de la figura 11.37, (*a*) deduzca una expresión para la potencia compleja suministrada por la fuente en términos de la resistencia desconocida *R*; (*b*) calcule la capacitancia necesaria que se debe agregar en paralelo al inductor de 28 mH para lograr un FP unitario.

Un libro muy completo acerca de la generación de energía a partir del viento es de:

T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins y E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*, Chichester, England: Wiley, 2001.

EJERCICIOS

12.1 Sistemas polifásicos

1. Un dispositivo desconocido de tres terminales tiene terminales llamadas *b*, *c* y *e*. Cuando se instaló en un circuito dado, las mediciones indicaron que $V_{ec} = -9$ V y $V_{eb} = -0.65$ V. (*a*) Calcule V_{cb}. (*b*) Determine la potencia disipada en la unión *b-e* si la corriente I_b que fluye hacia la terminal marcada *b* es igual a 1 μA.
2. Un tipo común de transistor se conoce como MESFET, que es el acrónimo de ***m**etal-**s**emiconductor **f**ield **e**ffect **t**ransistor* (transistor de efecto de campo de semiconductor metálico). Tiene tres terminales llamadas compuerta (*g*, de "gate"), la fuente (*s*, de "source") y el drenador (*d*, de la palabra en inglés *drain*). Como ejemplo, considere un MESFET dado que opera en un circuito de manera que $V_{sg} = 0.2$ V y $V_{ds} = 3$ V. (*a*) Calcule V_{gs} y V_{dg}. (*b*) Si se encuentra que fluye a la terminal de corriente la corriente de compuerta (*g* de la palabra en inglés *gate*) $I_g = 100$ pA, calcule la potencia perdida en la unión compuerta-fuente.
3. Para cierta fuente trifásica conectada en Y, $\mathbf{V}_{an} = 400\underline{/33^\circ}$ V, $\mathbf{V}_{bn} = 400\underline{/153^\circ}$ V y $\mathbf{V}_{cx} = 160\underline{/208^\circ}$ V. Determine (*a*) $\mathbf{V}_{cn}$; (*b*) $\mathbf{V}_{an} - \mathbf{V}_{bn}$; (*c*) $\mathbf{V}_{ax}$; (*d*) $\mathbf{V}_{bx}$.
4. Describa lo que se entiende por fuente "polifásica", exprese una posible ventaja de tales fuentes que podría contrarrestar su complejidad adicional con respecto a las fuentes de potencia de una sola fase, y explique la diferencia entre fuentes "equilibradas" y "no equilibradas".
5. Varias de las tensiones correspondientes a cierto circuito están dadas por $\mathbf{V}_{12} = 9\underline{/30^\circ}$ V, $\mathbf{V}_{32} = 3\underline{/130^\circ}$ V y $\mathbf{V}_{14} = 2\underline{/10^\circ}$ V. Determine $\mathbf{V}_{21}$, $\mathbf{V}_{13}$, $\mathbf{V}_{34}$ y $\mathbf{V}_{24}$.
6. La tensión nodal que describe un circuito dado se puede expresar como $\mathbf{V}_{14} = 9 - j$ V, $\mathbf{V}_{24} = 3 + j3$ V y $\mathbf{V}_{34} = 8$ V. Calcule $\mathbf{V}_{12}$, $\mathbf{V}_{32}$ y $\mathbf{V}_{13}$. Exprese sus respuestas en forma fasorial.
7. En el circuito de la figura 12.29, desafortunadamente se han omitido los valores de las resistencias, pero se conocen varias de las corrientes. Específicamente, $I_{ad} = 1$ A. (*a*) Calcule I_{ab}, I_{cd}, I_{de}, I_{fe} e I_{be}. (*b*) Si $V_{ba} = 125$ V, determine el valor de la resistencia que interconecta los nodos *a* y *b*.

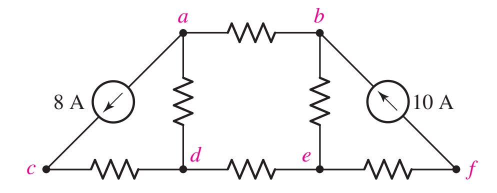


FIGURA 12.29

8. Para el circuito que se muestra en la figura 12.30, (*a*) determine I_{gh}, I_{cd} e I_{dh}. (*b*) Calcule I_{ed}, I_{ei} e I_{jf}. (*c*) Si cada una de todas las resistencias del circuito tiene un valor de 1 Ω, determine las tres corrientes de malla que fluyen en sentido horario.

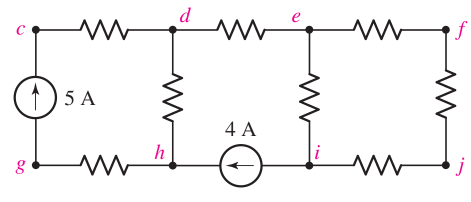


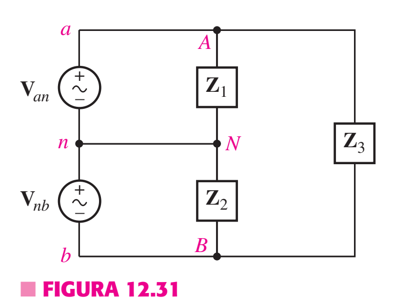
FIGURA 12.30

9. Se agregan resistencias en paralelo a las resistencias entre las terminales *d* y *e* y las terminales *f* y *j*, respectivamente, del circuito de la figura 12.30. (*a*) ¿Cuáles tensiones se pueden todavía describir usando notación de doble subíndice? (*b*) ¿Cuáles corrientes de línea se pueden todavía describir con notación de doble subíndice?

12.2 Sistemas monofásicos de tres hilos

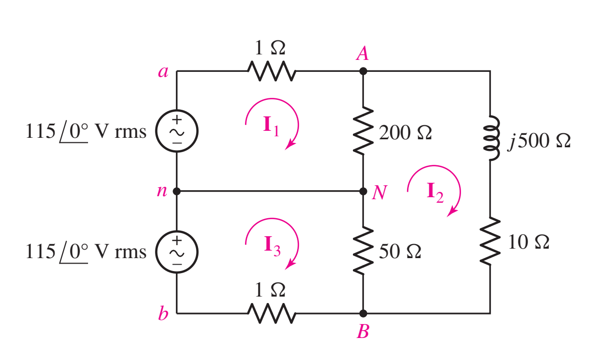
10. La mayoría de los aparatos electrónicos de consumo general están energizados por tomas de corriente de 110 V, pero varios tipos de aparatos (como las secadoras de ropa) se conectan a salidas de 220 V. Las tensiones más bajas son, en general, más seguras. ¿Entonces, qué es lo que motiva a los fabricantes de algunos equipos para diseñarlos para funcionar con 220 V?

11. El sistema monofásico de tres cables de la figura 12.31 tiene tres impedancias de carga independientes. Si la fuente está equilibrada y $\mathbf{V}_{an} = 110 + j0$ V rms, (*a*) exprese $\mathbf{V}_{an}$ y $\mathbf{V}_{bn}$ en notación fasorial. (*b*) Determine la tensión fasorial que aparece entre las terminales de la impedancia $\mathbf{Z}_3$. (*c*) Determine la potencia promedio suministrada por las dos fuentes si $\mathbf{Z}_1 = 50 + j0\ \Omega$, $\mathbf{Z}_2 = 100 + j45\ \Omega$ y $\mathbf{Z}_3 = 100 - j90\ \Omega$. (*d*) Represente la carga $\mathbf{Z}_3$ mediante una conexión en serie de dos elementos y exprese sus valores respectivos si las fuentes operan a 60 Hz.

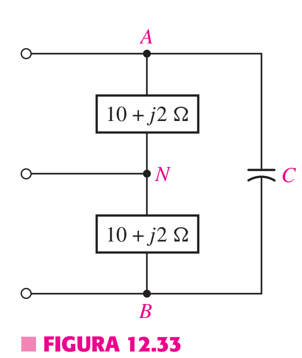


■ **FIGURA 12.31**

12. Para el sistema representado en la figura 12.32, las pérdidas óhmicas en el alambre neutro son tan pequeñas que se pueden despreciar y se puede modelar adecuadamente como un cortocircuito. (*a*) Calcule la pérdida de potencia en las dos líneas como resultado de su resistencia diferente a cero. (*b*) Calcule la potencia promedio que se suministra a la carga. (*c*) Determine el factor de potencia de toda la carga.



■ **FIGURA 12.32**



■ **FIGURA 12.33**

13. Con referencia a la carga equilibrada que se representa en la figura 12.33, si se conecta a una fuente equilibrada de tres cables que opera en 50 Hz de modo que $V_{AN} = 115$ V, (*a*) determine el factor de potencia de la carga si se omite el capacitor; (*b*) determine el valor de la capacitancia *C* que permitirá tener un factor de potencia igual a la unidad para toda la carga.

14. En el sistema de tres cables de la figura 12.32, (*a*) reemplace la resistencia de 50 Ω por una resistencia de 200 Ω y calcule la corriente que fluye por el cable neutro. (*b*) determine un nuevo valor para la resistencia de 50 Ω de manera que la magnitud de la corriente del alambre neutro sea 25% del de la corriente de línea $\mathbf{I}_{aA}$.

12.3 Conexión Y-Y trifásica

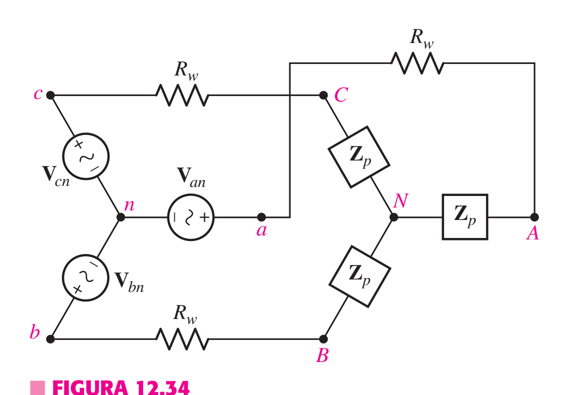
15. (*a*) Demuestre que si $\mathbf{V}_{an} = 400\underline{/33^\circ}$ V, $\mathbf{V}_{bn} = 400\underline{/-87^\circ}$ V y $\mathbf{V}_{bn} = 400\underline{/-207^\circ}$ V, entonces $\mathbf{V}_{an} + \mathbf{V}_{bn} + \mathbf{V}_{cn} = 0$. (*b*) ¿Las tensiones del inciso (*a*) representan secuencia de fase positiva o negativa? *Explique*.

16. Considere un sistema simple con secuencia de fase positiva, tres fases, tres cables, que opera en 50 Hz con una carga equilibrada. Cada tensión de fase de 240 V está conectada a las terminales de una carga compuesta por la conexión en serie de 50 Ω y 500 mH. Calcule

(*a*) cada corriente de línea; (*b*) el factor de potencia de la carga; (*c*) la potencia total suministrada por la fuente trifásica.

17. Suponga que el sistema que se muestra en la figura 12.34 está equilibrado, $R_w = 0$, $\mathbf{V}_{an} = 208\underline{/0°}$ V, y con secuencia de fase positiva. Calcule todas las corrientes de fase y de línea y todas las tensiones de fase y de línea si $\mathbf{Z}_p$ es igual a (*a*) 1 kΩ; (*b*) $100 + j48$ Ω; (*c*) $100 - j48$ Ω.

EJR 15



■ **FIGURA 12.34**


18. Repita el ejercicio 17 con $R_w = 10$ Ω y verifique sus respuestas mediante simulaciones PSpice si la frecuencia de operación es de 60 Hz.

19. Cada impedancia $\mathbf{Z}_p$ en el sistema equilibrado trifásico de la figura 12.34 está compuesta con una conexión en paralelo de una capacitancia de 1 mF, una inductancia de 100 mH y una resistencia de 10 Ω. Las fuentes tienen secuencia de fase positiva y operan a 50 Hz. Si $\mathbf{V}_{ab} = 208\underline{/0°}$ V y $R_w = 0$, calcule (*a*) todas las tensiones de fase; (*b*) todas las tensiones de línea; (*c*) las tres corrientes de línea; (*d*) la potencia total que consume la carga.

20. Suponiendo que el sistema representado en la figura 12.34 está equilibrado con la tensión de línea de 100 V, calcule la corriente de línea y la impedancia de carga por fase si $R_w = 0$ y la carga consume (*a*) 1 kW con un FP de 0.85 atrasado; (*b*) 300 W por fase con un FP de 0.92 adelantado.

21. El sistema trifásico equilibrado de la figura 12.34 se caracteriza por una secuencia de fase positiva y una tensión de línea de 300 V. $\mathbf{Z}_p$ está dada por la combinación en paralelo de una carga capacitiva de $5 - j3$ Ω y una carga inductiva de $9 + j2$ Ω. Si $R_w = 0$, calcule (*a*) el factor de potencia de la fuente; (*b*) la potencia total suministrada por la fuente; (*c*) repita los incisos (*a*) y (*b*) si $R_w = 1$ Ω.

22. Una carga balanceada conectada en Y de $100 + j50$ Ω está conectada a una fuente trifásica equilibrada. Si la corriente de línea es de 42 A y la fuente suministra 12 kW, determine (*a*) la tensión de línea; (*b*) la tensión de fase.


23. Un sistema trifásico está construido con una fuente equilibrada conectada en Y que opera a 50 Hz y tiene una tensión de línea de 210 V, y cada fase de la carga equilibrada consume 130 W con un factor de potencia adelantado de 0.75. (*a*) Calcule la corriente de línea y la potencia total suministrada a la carga. (*b*) Si una carga puramente resistiva de 1 Ω se conecta en paralelo con cada carga existente, calcule la nueva corriente de línea y la potencia total suministrada a la carga. (*c*) Verifique sus respuestas usando simulaciones PSpice adecuadas.

24. Volviendo al sistema trifásico equilibrado que se describió en el ejercicio 21, determine la potencia compleja suministrada a la carga tanto para $R_w = 0$ como para $R_w = 1$ Ω.


25. Cada carga en el circuito de la figura 12.34 está compuesta por un inductor de 1.5 H en paralelo con un capacitor de 100 μF y una resistencia de 1 kΩ. La resistencia $R_w = 0$ Ω. Usando secuencia de fase positiva con $\mathbf{V}_{ab} = 115\underline{/0°}$ V en $f = 60$ Hz, determine la corriente de línea rms y la potencia total suministrada a la carga. Verifique sus respuestas con una simulación PSpice adecuada.

12.4 Conexión delta (Δ)

26. Un sistema trifásico equilibrado está suministrando 10 kW a una carga conectada en Δ con un factor de potencia adelantado de 0.7. Si la tensión de fase es de 208 V y la fuente opera a 50 V, (*a*) calcule la corriente de línea; (*b*) determine la impedancia de fase; (*c*) calcule el nuevo factor de potencia y la nueva potencia total suministrada a la carga si se conecta un inductor de 2.5 H en paralelo con cada fase de la carga.

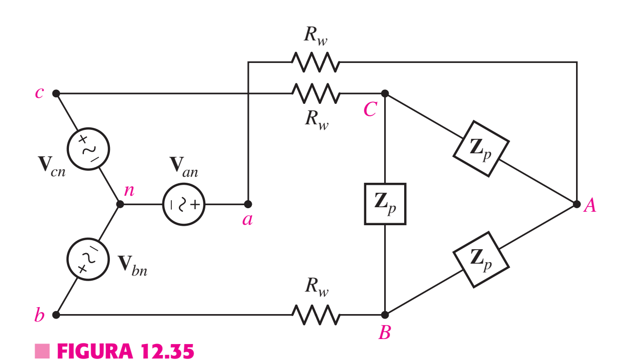
27. Si cada una de las tres fases en una carga equilibrada conectada en Δ se compone de un capacitor de 10 mF en paralelo con la conexión en serie de una resistencia de 470 Ω conectado en serie y una combinación inductora de 4 mH, suponga una tensión de fase de 400 V a 50 Hz. (*a*) Calcule la corriente de fase; (*b*) la corriente de línea; (*c*) la tensión de línea; (*d*) el factor de potencia con el que opera la fuente; (*e*) la potencia total suministrada a la carga.

28. Una carga trifásica va a recibir potencia de una fuente trifásica de tres cables y tres fases conectada en Y que tiene tensión de fase de 400 V y opera a 50 Hz. Cada fase de la carga consiste en una combinación en paralelo de una resistencia de 500 Ω, un inductor de 10 mH y un capacitor de 1 mF. (*a*) Calcule la corriente de línea, la tensión de línea, la corriente de fase y el factor de potencia de la carga si la carga también está conectada en Y. (*b*) Modifique el alambrado de la carga de modo que esté conectado en Δ y determine las mismas cantidades que se piden en el inciso (*a*).

29. Para las dos situaciones que se describen el ejercicio 28, calcule la potencia total que se suministra a cada una de las dos cargas.

30. Dos cargas conectadas en Δ están conectadas entre ellas en paralelo y son alimentadas por un sistema conectado en Y. La menor de las dos cargas consume 10 kVA con un FP atrasado de 0.75, y la mayor toma 25 kVA con un FP adelantado de 0.80. La tensión de línea es de 400 V. Calcule (*a*) el factor de potencia con el que opera la fuente; (*b*) la potencia total que consumen las dos cargas; (*c*) la corriente de fase de cada carga.

31. Para el sistema trifásico equilibrado que se muestra en la figura 12.35, se determina que se pierden 100 W en cada cable. Si la tensión de fase de la fuente es de 400 V y la carga consume 12 kW con un FP atrasado de 0.83, determine la resistencia del cable R_w.



EJER 25

■ **FIGURA 12.35**

32. La carga equilibrada conectada en Δ de la figura 12.35 demanda 10 kVA con un FP atrasado de 0.91. Si las pérdidas en las líneas son despreciables, calcule $\mathbf{I}_{bB}$ y $\mathbf{V}_{an}$ si $\mathbf{V}_{ca} = 160\underline{/30^\circ}$ V y las tensiones de la fuente se describen usando secuencia de fase positiva.



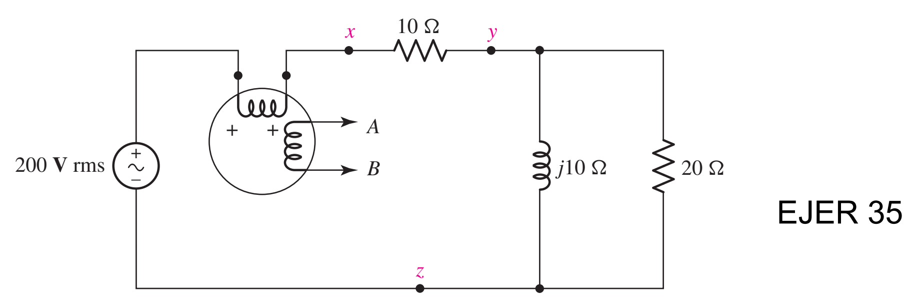
33. Repita el ejercicio 32 si $R_w = 1\ \Omega$. Verifique su solución usando una simulación PSpice adecuada.

34. Calcule $\mathbf{I}_{aA}$, $\mathbf{I}_{AB}$ y $\mathbf{V}_{an}$ si la carga conectada en Δ de la figura 12.35 toma una potencia compleja total de $1\,800 + j700$ W, $R_w = 1.2\ \Omega$ y la fuente genera una potencia compleja de $1\,850 + j700$ W.

35. Un sistema trifásico equilibrado que tiene una tensión de línea de 240 V rms contiene una carga conectada en Δ de $12 + j$ kΩ por fase y también una carga conectada en Y de $5 + j3$ kΩ por fase. Encuentre la corriente de línea, la potencia que toma la carga combinada y el factor de potencia de la carga.

12.5 Medición de potencia en sistemas trifásicos

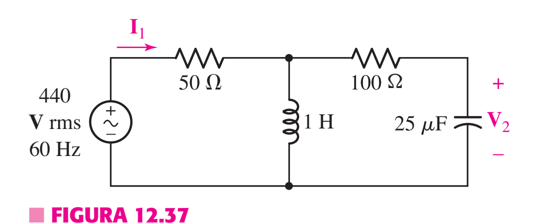
36. Encuentre la potencia leída por el wattímetro (para ello debe establecer si los hilos de conexión tienen que invertirse o no para obtenerla) en el circuito de la figura 12.36, si las terminales *A* y *B*, respectivamente, se conectan a (*a*) *x* y *y*; (*b*) *x* y *z*; (*c*) *y* y *z*.



■ FIGURA 12.36

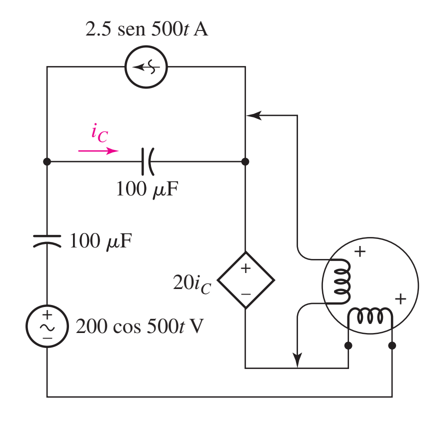


37. Se conecta un wattímetro en el circuito de la figura 12.37, de manera que $\mathbf{I}_1$ entra en la terminal (+) de la bobina de corriente mientras que $\mathbf{V}_2$ es la tensión de la bobina de potencial (de tensión). Proporcione la lectura del wattímetro y obtenga la solución con una simulación de PSpice apropiada.



■ FIGURA 12.37

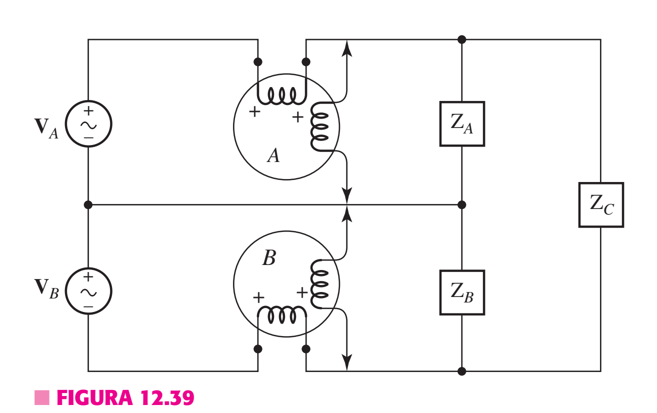
38. Obtenga la lectura dada por el wattímetro conectado en el circuito de la figura 12.38.



■ FIGURA 12.38



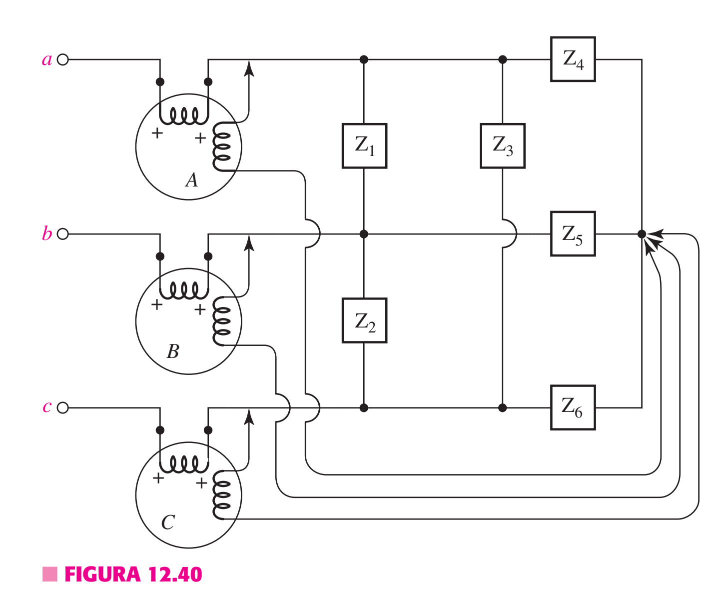
39. (*a*) Proporcione ambas lecturas dadas por los wattímetros de la figura 12.39 si $\mathbf{V}_A = 100\underline{/0°}$ V rms, $\mathbf{V}_B = 50\underline{/90°}$ V rms, $\mathbf{Z}_A = 10 - j10\ \Omega$, $\mathbf{Z}_B = 8 + j6\ \Omega$ y $\mathbf{Z}_C = 30 + j10\ \Omega$. (*b*) ¿La suma de estas lecturas es igual a la potencia activa total tomada por las tres cargas? Verifique sus respuestas con una simulación PSpice apropiada.



■ **FIGURA 12.39**

40. Los valores de los parámetros del circuito de la figura 12.40 son $\mathbf{V}_{ab} = 200\underline{/0^\circ}$, $\mathbf{V}_{bc} = 200\underline{/120^\circ}$, $\mathbf{V}_{ca} = 200\underline{/240^\circ}$ V rms, $\mathbf{Z}_4 = \mathbf{Z}_5 = \mathbf{Z}_6 = 25\underline{/30^\circ}\ \Omega$, $\mathbf{Z}_1 = \mathbf{Z}_2 = \mathbf{Z}_3 = 50\underline{/-60^\circ}\ \Omega$. Determine la lectura dada por cada wattímetro.





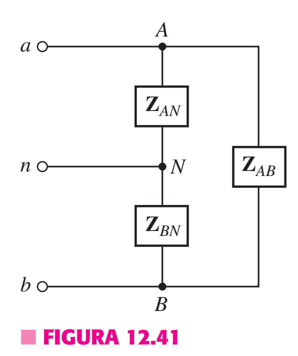
■ **FIGURA 12.40**

Ejercicios de integración de capítulo

41. Explique en qué circunstancias se puede preferir una carga conectada en Δ sobre una carga conectada en Y que tome la misma potencia promedio y la misma potencia compleja.

42. Cierta fuente de 208 V, 60 Hz, tres fases, se conecta en Y y muestra secuencia de fase positiva. Cada fase de la carga equilibrada consiste en una bobina que se modela como una resistencia de 0.2 Ω en serie con una inductancia de 580 mH. (*a*) Determine las tensiones de línea y la corriente en fase si la carga está conectada en Δ. (*b*) Repita el inciso (*a*) si la carga es conectada en Y.

43. (*a*) ¿La carga representada en la figura 12.41 se considera una carga trifásica? *Explique*. (*b*) Si $\mathbf{Z}_{AN} = 1 - j7\ \Omega$, $\mathbf{Z}_{BN} = 3\underline{/22^\circ}\ \Omega$ y $\mathbf{Z}_{AB} = 2 + j\Omega$, calcule todas las corrientes y tensiones de fase (y de línea) suponiendo una tensión de fase a neutro de 120 Vca (las dos fases están desfasadas 180°). (*c*) ¿En qué circunstancias fluye la corriente en el cable neutro?



■ **FIGURA 12.41**

44. Los equipos de computación en una pequeña planta de manufactura trabajan todos con corriente estándar de 120 Vca, pero sólo hay disponible potencia trifásica de 208 Vca. Explique cómo se puede conectar el equipo al alambrado de potencia existente.

- De acuerdo con la convención del punto, una corriente que entra a la terminal *con punto* de una bobina produce una tensión en circuito abierto con una referencia de tensión positiva en la terminal *con punto* de la segunda bobina. (Ejemplos 13.1, 13.2, 13.3)
- La energía total almacenada en un par de bobinas acopladas incluye tres términos independientes: las dos energías almacenadas en cada una de las autoinductancias representada por el término ($\frac{1}{2}Li^2$) en cada caso y la energía almacenada en la inductancia mutua (Mi_1i_2). (Ejemplo 13.4)
- El coeficiente de acoplamiento está dado por $k = M/\sqrt{L_1L_2}$, y se restringe a valores entre 0 y 1. (Ejemplo 13.4)
- Un transformador lineal consta de dos bobinas acopladas: el devanado primario y el devanado secundario. (Ejemplos 13.5, 13.6)
- Un transformador ideal es un modelo útil de los transformadores prácticos con núcleo de hierro. El coeficiente de acoplamiento se considera unitario y se supone que los valores de inductancia serán infinitos. (Ejemplos 13.7, 13.8)
- La relación (o razón) del número de vueltas $a = N_2/N_1$ de un transformador ideal se relaciona con las tensiones respectivas de la bobina del primario y la del secundario: $\mathbf{V}_2 = a\mathbf{V}_1$. (Ejemplo 13.8)
- La relación (o razón) del número de vueltas a relaciona también las corrientes en las bobinas respectivas del primario y del secundario: $\mathbf{I}_1 = a\mathbf{I}_2$. (Ejemplos 13.7, 13.8)

LECTURAS ADICIONALES

Casi todo lo que se desea saber acerca de los transformadores puede encontrarse en:

M. Heathcote, *J&P Transformer Book*, 12a. ed., Oxford: Reed Educational and Professional Publishing Ltd., 1998.

Otro título muy completo acerca de transformadores es:

W. T. McLyman, *Transformer and Inductor Design Handbook*, 3a. ed., Nueva York: Marcel Dekker, 2004.

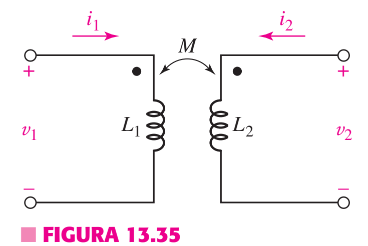
Un buen libro acerca de transformadores con un fuerte enfoque económico es:

B. K. Kennedy, *Energy Efficient Transformers,* Nueva York: McGrawHill, 1998.

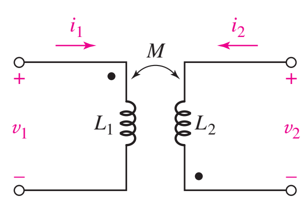
EJERCICIOS

13.1 Inductancia mutua

1. Considere las dos inductancias representadas en la figura 13.35. Suponga $L_1 = 10$ mH, $L_2 = 5$ mH y $M = 1$ mH. Determine la expresión en estado estable para (*a*) v_1 si $i_1 = 0$ e $i_2 = 5 \cos 8t$ A; (*b*) v_2 si $i_1 = 3$ sen $100t$ A e $i_2 = 0$; (*c*) v_2 si $i_1 = 5 \cos(8t - 40°)$ A e $i_2 = 4$ sen $8t$ A.

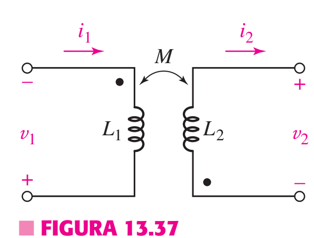


■ FIGURA 13.35

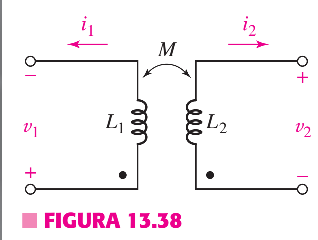


■ **FIGURA 13.36**

2. Con referencia a la figura 13.36, suponga $L_1 = 400$ mH, $L_2 = 230$ mH y $M = 10$ mH. Determine la expresión en estado estable para (*a*) v_1 si $i_1 = 0$ e $i_2 = 2 \cos 40t$ A; (*b*) v_2 si $i_1 = 5 \cos (40t + 15°)$ A e $i_2 = 0$. (*c*) Repita los incisos (*a*) y (*b*) si M se aumenta a 300 mH.
3. En la figura 13.37, suponga $L_1 = 1$ μH, $L_2 = 2\mu$H y $M = 150$ nH. Obtenga una expresión en estado estable para (*a*) v_1 si $i_2 = -\cos 70t$ mA e $i_1 = 0$; (*b*) v_2 si $i_1 = 55 \cos (5t - 30°)$ A; (*c*) v_2 si $i_1 = 6$ sen $5t$ A e $i_2 = 3$ sen $5t$.

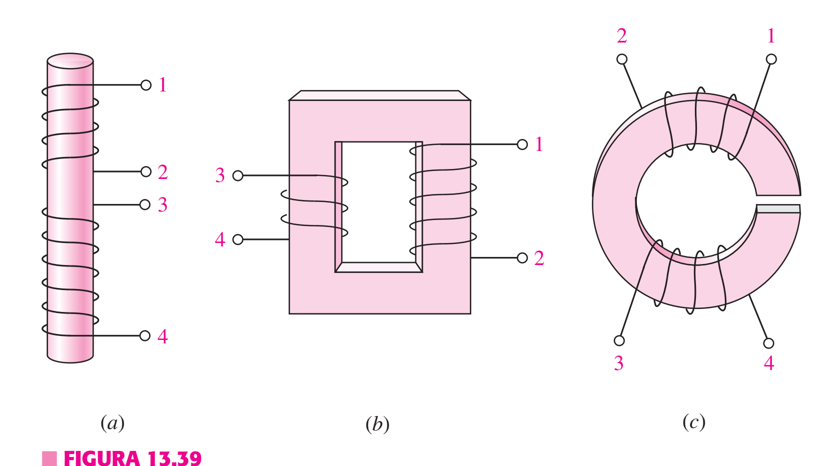


■ **FIGURA 13.37**



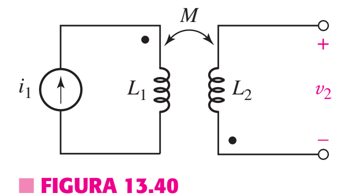
■ **FIGURA 13.38**

4. Para la configuración de la figura 13.38, $L_1 = 0.5L_2 = 1$ mH y $M = 0.85\sqrt{L_1 L_2}$. Calcule $v_2(t)$ si (*a*) $i_2 = 0$ e $i_1 = 5e^{-t}$ mA; (*b*) $i_2 = 0$ e $i_1 = 5 \cos 10t$ mA; (*c*) $i_2 = 5 \cos 70t$ mA e $i_1 = 0.5i_2$.
5. En la figura 13.39 se muestra la construcción física de tres pares de bobinas acopladas. Señale las dos diferentes ubicaciones posibles de los dos puntos en cada par de bobinas.



■ **FIGURA 13.39**

6. En el circuito de la figura 13.40, $i_1 = 5$ sen $(100t - 80°)$ mA, $L_1 = 1$ H y $L_2 = 2$ H. Si $v_2 = 250$ sen $(100t - 80°)$ mV, calcule M.

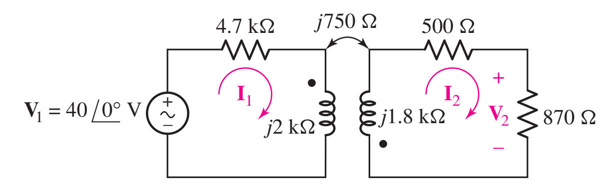


■ **FIGURA 13.40**

7. En el circuito representado en la figura 13.40, determine i_1 si $v_2(t) = 4 \cos 5t$ V, $L_1 = 1$ mH, $L_2 = 4$ mH y $M = 1.5$ mH.
8. Calcule v_1 y v_2 si $i_1 = 5$ sen $40t$ mA e $i_2 = 5 \cos 40t$ mA, $L_1 = 1$ mH, $L_2 = 3$ mH y $M = 0.5$ mH, para las inductancias acopladas que se muestran en (*a*) la figura 13.37; (*b*) la figura 13.38.

9. Calcule v_1 y v_2 si $i_1 = 3\cos(2000t + 13°)$ mA e $i_2 = 5$ sen $400t$ mA, $L_1 = 1$ mH, $L_2 = 3$ mH y $M = 200$ nH, para las inductancias acopladas que se muestran en (*a*) la figura 13.35, (*b*) la figura 13.36.

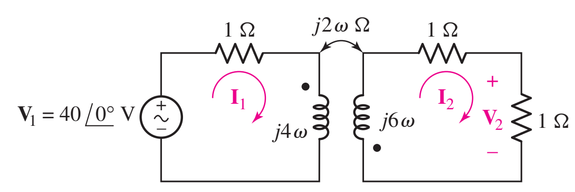
10. Para el circuito de la figura 13.41, calcule $\mathbf{I}_1$, $\mathbf{I}_2$, $\mathbf{V}_2/\mathbf{V}_1$ e $\mathbf{I}_2/\mathbf{I}_1$.



■ **FIGURA 13.41**

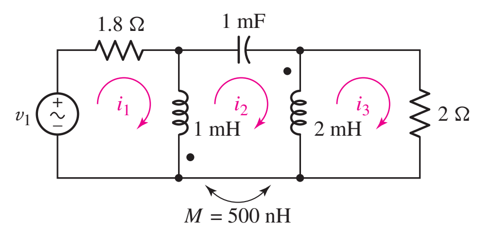


11. Para el circuito de la figura 13.42, grafique la magnitud de $\mathbf{V}_2/\mathbf{V}_1$ como una función de la frecuencia ω, dentro del intervalo $0 \le \omega \le 2$ rad/s.



■ **FIGURA 13.42**

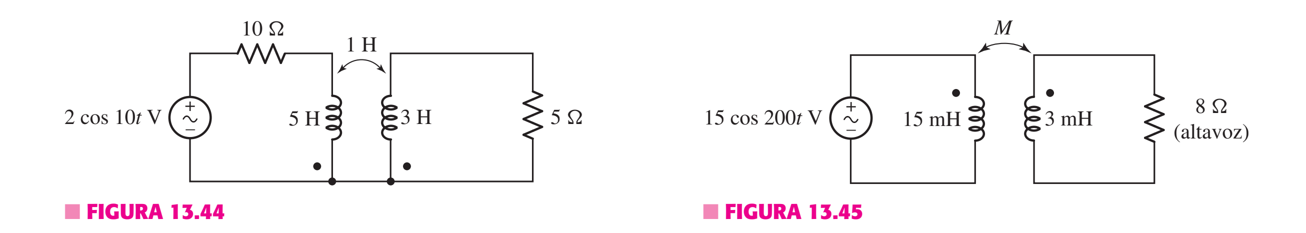
12. Para el circuito de la figura 13.43, (*a*) dibuje la representación en los fasores; (*b*) escriba un sistema completo de ecuaciones de malla; (*c*) calcule $i_2(t)$ si $v_1(t) = 8$ sen $720t$ V.



■ **FIGURA 13.43**

13. En el circuito de la figura 13.43, M se reduce en un orden de magnitud. Calcule i_3 si $v_1 = 10\cos(800t - 20°)$ V.

14. En el circuito que se muestra en la figura 13.44, encuentre la potencia promedio absorbida por (*a*) la fuente; (*b*) cada una de las dos resistencias; (*c*) cada una de las dos inductancias; (*d*) la inductancia mutua.

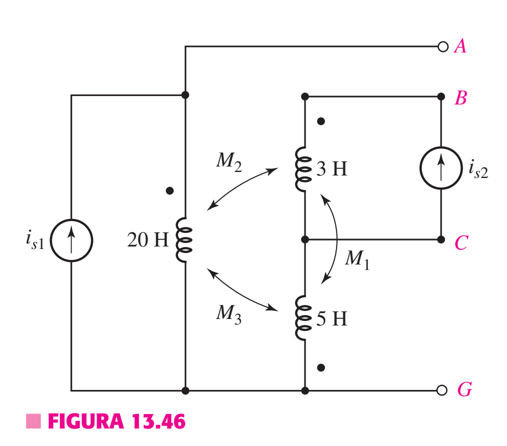


■ **FIGURA 13.44**

■ **FIGURA 13.45**

15. El circuito de la figura 13.45 está diseñado para accionar un altavoz simple de 8 Ω. ¿Qué valor de M da por resultado 1 W de potencia promedio suministrada al altavoz?

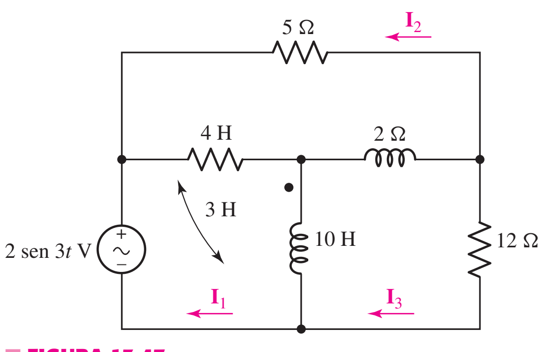
16. Considere el circuito de la figura 13.46. Las dos fuentes son $i_{s1} = 2 \cos t$ mA e $i_{s2} = 1.5$ sen t mA. Si $M_1 = 2$ H, $M_2 = 0$ H y $M_3 = 10$ H, calcule $v_{AG}(t)$.



■ **FIGURA 13.46**

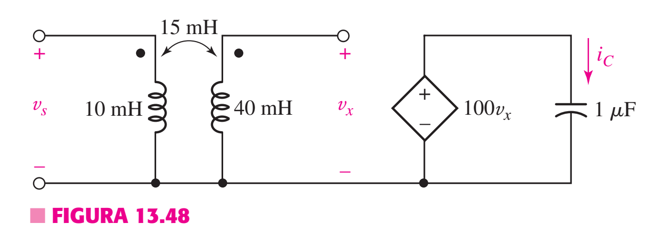
17. Para el circuito de la figura 13.46, $M_1 = 1$ H, $M_2 = 1.5$ H y $M_3 = 2$ H. Si $i_{s1} = 8 \cos 2t$ A e $i_{s2} = 7$ sen $2t$ A, calcule (*a*) $\mathbf{V}_{AB}$; (*b*) $\mathbf{V}_{AG}$; (*c*) $\mathbf{V}_{CG}$.

18. Para el circuito de la figura 13.47, encuentre las corrientes $i_1(t)$, $i_2(t)$ e $i_3(t)$ si $f = 60$ Hz.



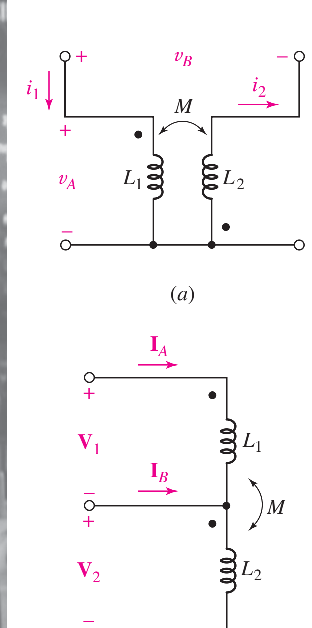
■ **FIGURA 13.47**

19. Determine la expresión de $i_C(t)$ válida para $t > 0$ en el circuito de la figura 13.48, si $v_s(t) = 10t^2u(t)/(t^2 + 0.01)$ V.



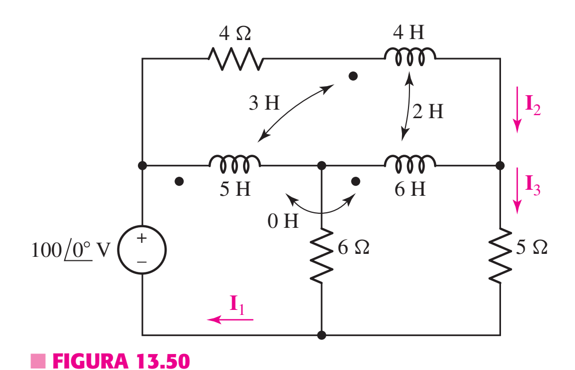
■ **FIGURA 13.48**

20. Para la red de inductores acoplados de la figura 13.49*a*, suponga $L_1 = 20$ mH, $L_2 = 30$ mH, $M = 10$ mH, y obtenga ecuaciones para v_A y v_B si (*a*) $i_1 = 0$ e $i_2 = 5$ sen $10t$; (*b*) $i_1 = 5 \cos 20t$ e $i_2 = 2 \cos(20t - 100°)$ mA. (*c*) Exprese $\mathbf{V}_1$ y $\mathbf{V}_2$ como funciones de $\mathbf{I}_A$ e $\mathbf{I}_B$ para la red que se muestra en la figura 13.49*b*.



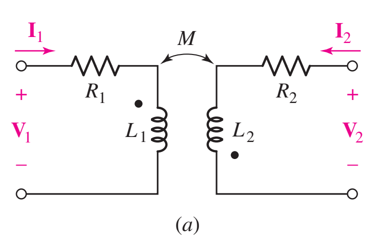
■ **FIGURA 13.49**

21. Observe que no hay acoplamiento mutuo entre los inductores de 5 y 6 H en el circuito de la figura 13.50. (*a*) Escriba un conjunto de ecuaciones en términos de $\mathbf{I}_1(j\omega)$, $\mathbf{I}_2(j\omega)$, e $\mathbf{I}_3(j\omega)$. (*b*) Calcule $\mathbf{I}_3(j\omega)$ si $\omega =$ rad/s.



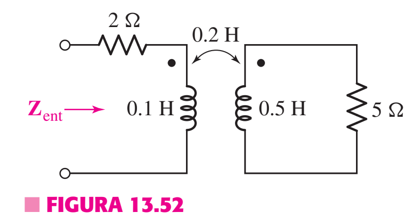
■ **FIGURA 13.50**

22. Calcule $\mathbf{V}_1(j\omega)$ y $\mathbf{V}_2(j\omega)$ en términos de $\mathbf{I}_1(j\omega)$ e $\mathbf{I}_2(j\omega)$ para cada circuito de la figura 13.51.



■ **FIGURA 13.51**

23. (*a*) Encuentre $\mathbf{Z}_{ent}(j\omega)$ en la red de la figura 13.52. (*b*) Grafique $\mathbf{Z}_{ent}$ sobre el intervalo de frecuencia de pulsación $0 \leq \omega \leq 1\,000$ rad/s. (*c*) Determine $\mathbf{Z}_{ent}(j\omega)$ para $\omega = 50$ rad/s.

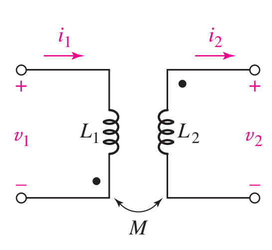


■ **FIGURA 13.52**

13.2 Consideraciones energéticas

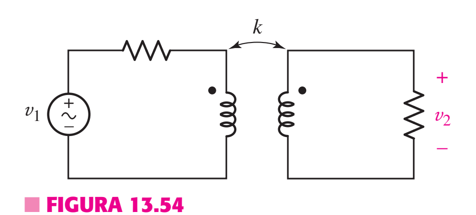
24. Para las bobinas acopladas de la figura 13.53, $L_1 = L_2 = 10$ H, y M es igual a su valor máximo posible. (*a*) Calcule el coeficiente de acoplamiento k. (*b*) Calcule la energía almacenada en el campo magnético que enlaza las dos bobinas en $t = 200$ ms si $i_1 = 10 \cos 4t$ mA e $i_2 = 2 \cos 4t$ mA.

25. Respecto a los inductores acoplados que se muestran en la figura 13.53, $L_1 = 10$ mH, $L_2 = 5$ mH y $k = 0.75$. (*a*) Calcule M. (*b*) Si $i_1 = 100$ sen $40t$ mA e $i_2 = 0$, calcule la energía almacenada en cada bobina y en el campo magnético que enlaza a los dos inductores en $t = 2$ ms. (*c*) Repita el inciso (*b*) si i_2 se iguala a 75 cos $40t$ mA.



■ **FIGURA 13.53**

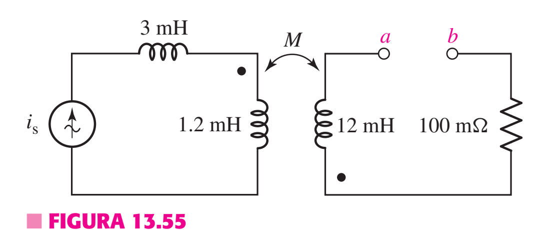
26. Para el circuito de la figura 13.54, $L_1 = 2$ mH, $L_2 = 8$ mH y $v_1 = \cos 8t$ V. (*a*) Obtenga una ecuación para $v_2(t)$. (*b*) Grafique $\mathbf{V}_2$ como una función de k. (*c*) Grafique el ángulo de fase (en grados) de $\mathbf{V}_2$ como una función de k.



■ **FIGURA 13.54**

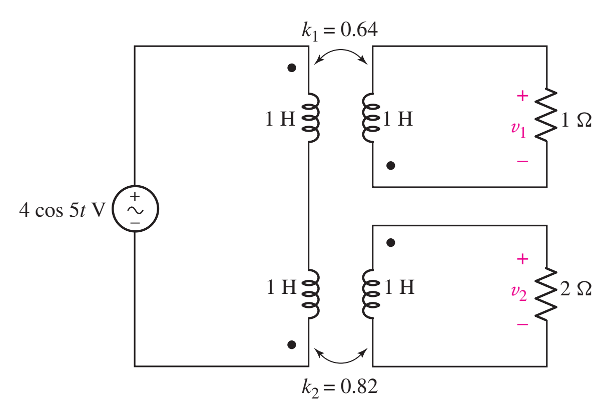
27. Conecte una carga $\mathbf{Z}_L = 5\underline{/33°}\ \Omega$ a las terminales del lado derecho de la figura 13.53. Deduzca una expresión para la impedancia de entrada en $f = 100$ Hz, vista desde las terminales del lado izquierdo, si $L_1 = 1.5$ mH, $L_2 = 3$ mH y $k = 0.55$.

28. Considere el circuito representado en la figura 13.55. El coeficiente de acoplamiento $k = 0.75$. Si $i_s = 5 \cos 200t$ mA, calcule la energía total almacenada en $t = 0$ y $t = 5$ ms si (*a*) *ab* está en circuito abierto (como se muestra); (*b*) *ab* está en cortocircuito.



■ **FIGURA 13.55**

29. Calcule v_1, v_2 y la potencia promedio suministrada a cada resistencia en el circuito de la figura 13.56.

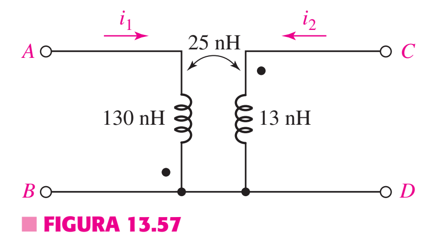


■ **FIGURA 13.56**

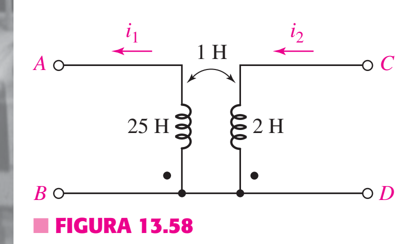
13.3 El transformador lineal

30. Suponga los siguientes valores para el circuito representado esquemáticamente en la figura 13.16: $R_1 = 10\ \Omega$, $R_2 = 1\ \Omega$, $L_1 = 2\ \mu$H, $L_2 = 1\ \mu$H y $M = 500$ nH. Calcule la impedancia de entrada para $\omega = 10$ rad/s si $\mathbf{Z}_L$ es igual a (*a*) 1 Ω; (*b*) $j\Omega$; (*c*) $-j\Omega$; (*d*) $5\underline{/33°}\ \Omega$.

31. Determine el equivalente T del transformador lineal representado en la figura 13.57 (dibuje e identifique adecuadamente el diagrama adecuado).



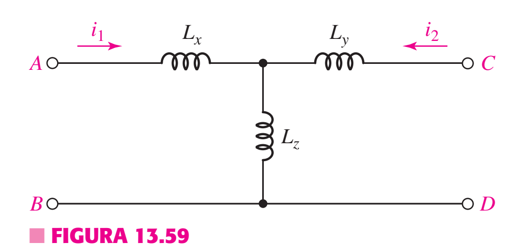
■ **FIGURA 13.57**



■ **FIGURA 13.58**

32. (*a*) Dibuje e identifique adecuadamente el diagrama de la red equivalente T para el transformador lineal que se muestra en la figura 13.58. (*b*) Verifique que los dos son equivalentes conectando una tensión $v_{AB} = 5$ sen $45t$ V y calculando la tensión a circuito abierto v_{CD}.

33. Represente la red que se muestra en la figura 13.59 y un transformador lineal equivalente si (*a*) $L_x = 1$ H, $L_y = 2$ H y $L_z = 4$ H; (*b*) $L_x = 10$ mH, $L_y = 50$ mH y $L_z = 22$ H.



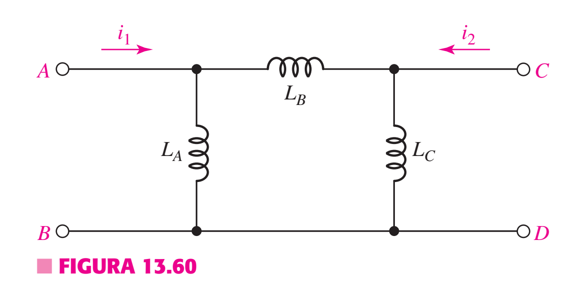
■ **FIGURA 13.59**

34. Suponiendo corriente inicial cero, obtenga una red Π equivalente del transformador representado en la figura 13.57.



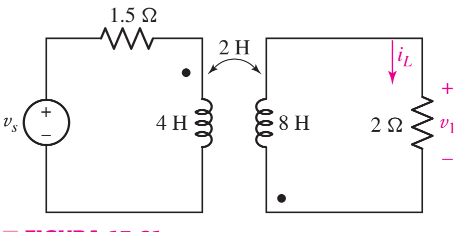
35. (*a*) Dibuje e identifique adecuadamente una red Π equivalente del transformador lineal que se muestra en la figura 13.58, suponiendo cero corriente inicial. (*b*) Verifique su equivalencia con una simulación adecuada.

36. Represente la red Π de la figura 13.60 como un transformador lineal equivalente con corriente inicial cero si (*a*) $L_A = 1$ H, $L_B = 2$ H y $L_C = 4$ H; (*b*) $L_A = 10$ mH, $L_B = 50$ mH y $L_C = 22$ mH.



■ **FIGURA 13.60**

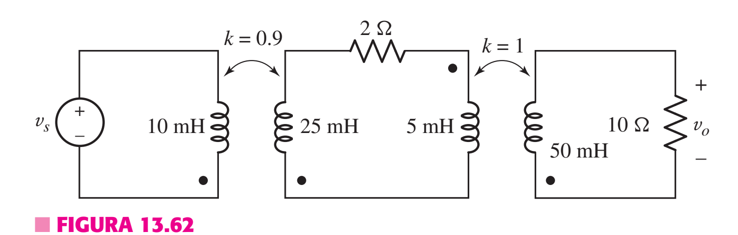
37. Para el circuito de la figura 13.61, determine una expresión para (*a*) $\mathbf{I}_L/\mathbf{V}_s$; (*b*) $\mathbf{V}_1/\mathbf{V}_s$.



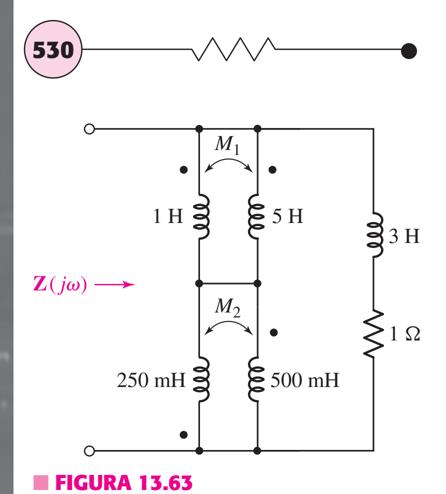
■ **FIGURA 13.61**



38. (*a*) Para el circuito de la figura 13.62, si $v_s = 8 \cos 1\,000t$ V, calcule v_o. (*b*) Verifique su solución mediante una simulación adecuada en PSpice.



■ **FIGURA 13.62**

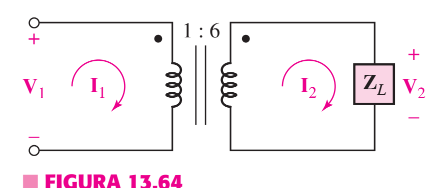


■ **FIGURA 13.63**

39. Respecto a la red que se muestra en la figura 13.63, deduzca una expresión para $\mathbf{Z}(j\omega)$ si M_1 y M_2 se ajustan a sus valores máximos respectivos.

13.4 El transformador ideal

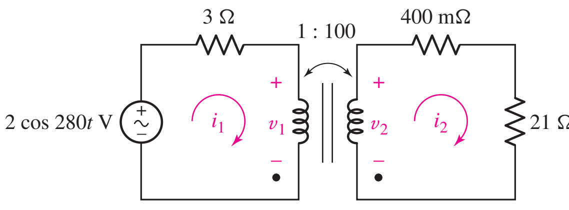
40. Calcule $\mathbf{I}_2$ y $\mathbf{V}_2$ para el circuito de transformador ideal de la figura 13.64 si (*a*) $\mathbf{V}_1 = 4\underline{/32°}$ V y $\mathbf{Z}_L = 1 - j\Omega$; (*b*) $\mathbf{V}_1 = 4\underline{/32°}$ V y $\mathbf{Z}_L = 0$; (*c*) $\mathbf{V}_1 = 2\underline{/118°}$ V y $\mathbf{Z}_L = 1.5\underline{/10°}$ Ω.



■ **FIGURA 13.64**

41. Respecto al circuito de transformador ideal representado en la figura 13.64, calcule $\mathbf{I}_2$ y $\mathbf{V}_2$ si (*a*) $\mathbf{I}_1 = 244\underline{/0°}$ mA y $\mathbf{Z}_L = 5 - j2$ Ω; (*b*) $\mathbf{I}_1 = 100\underline{/10°}$ mA y $\mathbf{Z}_L = j2$ Ω.

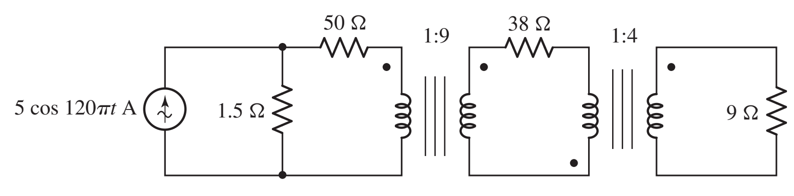
42. Calcule la potencia promedio suministrada a las resistencias de 400 mΩ y 21 Ω, respectivamente, en el circuito de la figura 13.65.



■ **FIGURA 13.65**

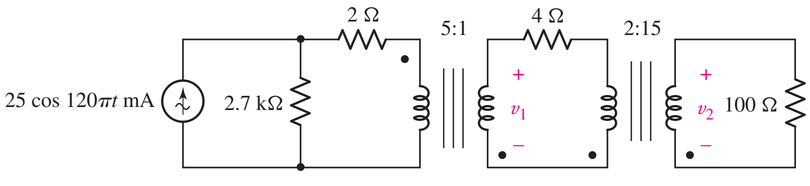
43. Respecto al circuito ideal de transformador representado en la figura 13.65, determine un circuito equivalente en el que (*a*) el transformador y el circuito primario se reemplazan, de modo que $\mathbf{V}_2$ e $\mathbf{I}_2$ permanezcan sin cambio; (*b*) el transformador y el circuito secundario se reemplazan de modo que $\mathbf{V}_1$ e $\mathbf{I}_1$ permanezcan sin cambio.

44. Calcule la potencia promedio suministrada a cada resistencia que se muestra en la figura 13.66.



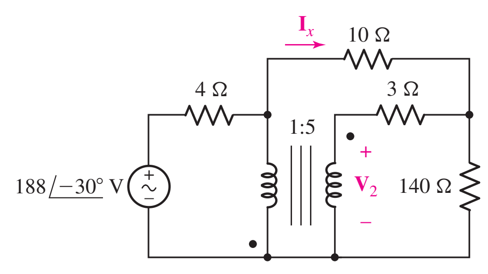
■ **FIGURA 13.66**

45. Respecto al circuito representado en la figura 13.67, calcule (*a*) las tensiones v_1 y v_2; (*b*) la potencia promedio suministrada a cada resistencia.



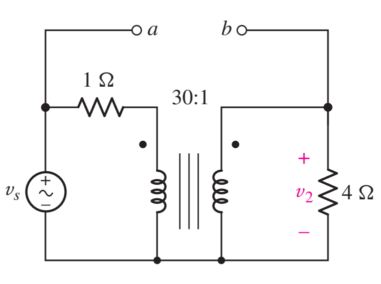
■ **FIGURA 13.67**

46. Calcule $\mathbf{I}_x$ y $\mathbf{V}_2$ marcados en la figura 13.68.



■ **FIGURA 13.68**

47. Se quita el transformador ideal del circuito de la figura 13.68, se gira por su eje vertical y se reconecta de tal manera que las mismas terminales permanecen conectadas a la terminal negativa de la fuente. (*a*) Calcule $\mathbf{I}_x$ y $\mathbf{V}_2$. (*b*) Repita el inciso (*a*) si ambos puntos están colocados en las terminales inferiores del transformador.



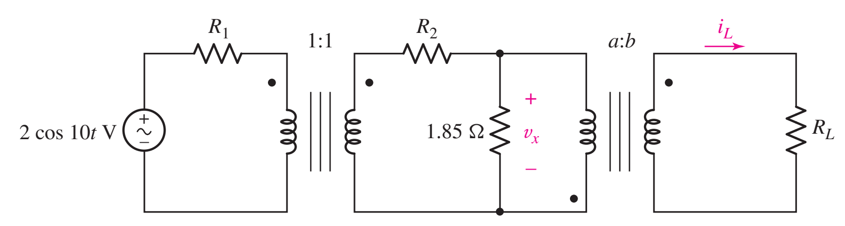
■ **FIGURA 13.69**

48. Para el circuito de la figura 13.69, $v_s = 117$ sen $500t$ V. Calcule v_2 si las terminales marcadas *a* y *b* (*a*) se dejan en circuito abierto; (*b*) se ponen en cortocircuito; (*c*) se puentean con una resistencia de 2 Ω.

49. La relación de vueltas del transformador ideal en la figura 13.69 se cambia de 30:1 a 1:3. Tome $v_s = 720 \cos 120\pi t$ V, y calcule v_2 si las terminales *a* y *b* (*a*) se ponen en cortocircuito; (*b*) se puentean con una resistencia de 10 Ω; (*c*) se puentean con una resistencia de 1 MΩ.



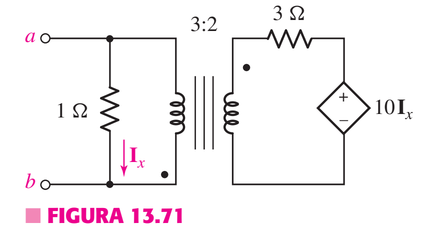
50. Para el circuito de la figura 13.70, $R_1 = 1$ Ω, $R_2 = 4$ Ω y $R_L = 1$ Ω. Seleccione *a* y *b* para lograr una tensión pico de 200 V de magnitud entre las terminales de R_L.



■ **FIGURA 13.70**

51. Calcule v_x para el circuito de la figura 13.70 si $a = 0.01b = 1$, $R_1 = 300$ Ω, $R_2 = 14$ Ω y $R_L = 1$ kΩ.


52. (*a*) Con referencia al circuito de transformador ideal en la figura 13.70, determine la corriente de la carga i_L si $b = 0.25a = 1$, $R_1 = 2.2$ Ω, $R_2 = 3.1$ Ω y $R_L = 200$ Ω. (*b*) Verifique su solución mediante una simulación adecuada en PSpice.

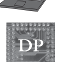


■ **FIGURA 13.71**

53. Determine el equivalente de Thévenin de la red de la figura 13.71 visto desde las terminales *a* y *b*.

54. Calcule $\mathbf{V}_2$ y la potencia promedio suministrada a la resistencia de 8 Ω de la figura 13.72 si $\mathbf{V}_s = 10\underline{/15°}$ V y el parámetro de control *c* es igual a (*a*) 0; (*b*) 1 mS.

■ **FIGURA 13.72**

55. (*a*) Para el circuito de la figura 13.72, tome $c = -2.5$ mS y seleccione valores de a y b de manera que se suministre una potencia promedio de 100 W a la carga de 8 Ω cuando $\mathbf{V}_s = 5\underline{/-35°}$ V, (*b*) verifique su solución con una simulación adecuada en PSpice.

Ejercicios de integración del capítulo



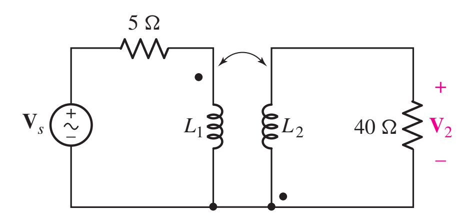
56. Un transformador cuya placa indica 2 300/230 V, 25 kVA opera con voltajes primario y secundario de 2 300 V y 230 V rms, respectivamente, y puede suministrar 25 kVA desde su devanado secundario. Si este transformador se alimenta con 2 300 V rms y se conecta a cargas secundarias que necesitan 8 kW con factor de potencia (PF) igual a 1 y 15 kVA con PF 0.8 en retraso, (*a*) ¿cuál es la corriente primaria?, (*b*) ¿cuántos kilowatts puede todavía suministrar el transformador a una carga que opera a PF 0.95 en retraso? (*c*) Verifique sus respuestas con PSpice.



57. Un amigo trae un sistema de estéreo de colección a su regreso de un viaje reciente a Warnemünde, sin saber que estaba diseñado para operar con el doble de la tensión (240 Vca) de suministro disponible en los tomacorrientes estadounidenses. Diseñe un circuito que permita a su amigo escuchar el estéreo en Estados Unidos, suponiendo que se puede despreciar la diferencia en la frecuencia de operación (50 Hz en Alemania, 60 Hz en Estados Unidos).

58. El amigo al que se refiere el ejercicio 57 intenta justificar la suposición errónea que hizo con respecto al estéreo señalando que el tomacorriente de pared en el baño tenía un socket para su rasuradora eléctrica de Estados Unidos, claramente marcado 120 Vca. No observó que el pequeño letrero debajo del tomacorriente decía claramente "Sólo rasuradoras". Con el conocimiento de que todas las líneas de potencia que entraban al cuarto operaban en 240 Vca, dibuje el probable circuito construido en el interior del tomacorriente del baño y explique por qué está limitado a "sólo rasuradoras".

59. Obtenga una expresión para $\mathbf{V}_2/\mathbf{V}_s$ en el circuito de la figura 13.73 si (*a*) $L_1 = 100$ mH, $L_2 = 500$ mH y M es su valor máximo posible; (*b*) $L_1 = 5L_2 = 1.4$ H y $k = 87\%$ de su valor máximo posible; (*c*) las dos bobinas se pueden tratar como un transformador ideal, en el que la bobina del lado izquierdo tiene 500 vueltas y la bobina del lado derecho tiene 10 000 vueltas.



■ FIGURA 13.73

60. Usted observa que su vecino ha instalado una gran bobina de alambre muy próxima a la línea de potencia que entra a la casa de usted. (No hay cables subterráneos en su barrio.) (*a*) ¿Cuál es la probable intención de su vecino? (*b*) ¿Es probable que su plan tenga éxito? *Explique*. (*c*) Al preguntarle, su vecino simplemente se encogió de hombros y explicó que de ninguna manera le puede costar a usted nada, de cualquier modo, ya que no hay nada de él que esté tocando la propiedad de usted. ¿Cierto o falso? *Explique*.

buscarse en tablas de transformadas (como la tabla 14.1). (Ejemplos 14.4, 14.5, 14.6, 14.10)

- Los teoremas de diferenciación e integración permiten convertir ecuaciones integrodiferenciales en el dominio del tiempo en simples ecuaciones algebraicas en el dominio de la frecuencia. (Ejemplos 14.7, 14.8, 14.9)
- Los teoremas del valor inicial y del valor final son útiles cuando sólo se desean los valores específicos $f(t = 0^+)$ o $f(t \to \infty)$. (Ejemplo 14.11)

LECTURAS ADICIONALES

Un desarrollo de fácil lectura acerca de la transformada de Laplace y algunas de sus propiedades clave se puede encontrar en el capítulo 4 de

A. Pinkus y S. Zafrany, *Fourier Series and Integral Transforms*, Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press, 1997.

Un tratamiento mucho más detallado de las transformadas integrales y su aplicación a los problemas de ciencia e ingeniería puede encontrarse en

B. Davies, *Integral Transforms and Their Applications*, 3a. ed., Nueva York: Springer-Verlag, 2002.

La estabilidad y la prueba de Routh se estudian en el capítulo 5 de

K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 4a. ed., Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 2002.

EJERCICIOS

14.1 Frecuencia compleja

1. Determine el conjugado complejo de cada una de las siguientes expresiones: (*a*) $8 - j$; (*b*) $8e^{-9t}$; (*c*) 22.5; (*d*) $4e^{j9}$; (*e*) $j2e^{-j11}$.
2. Calcule el conjugado complejo de cada una de las siguientes expresiones: (*a*) -1; (*b*) $\dfrac{-j}{5\angle 20^\circ}$; (*c*) $5e^{-j5} + 2e^{j3}$; (*d*) $(2 + j)(8\angle 30^\circ)e^{j2t}$.
3. Se escriben varias tensiones reales en una hoja de papel, pero se derrama café a lo largo de la mitad de cada uno. Complete las expresiones de tensión si la parte legible es (*a*) $5e^{-j50t}$; (*b*) $(2 + j)e^{j9t}$; (*c*) $(1 - j)e^{j78t}$; (*d*) $-je^{-5t}$. Suponga que las unidades de cada tensión son volts (V).
4. Exprese la frecuencia compleja o las frecuencias complejas correspondientes a cada función: (*a*) $f(t) = \text{sen } 100t$; (*b*) $f(t) = 10$; (*c*) $g(t) = 5e^{-7t}\cos 80t$; (*d*) $f(t) = 5e^{8t}$; (*e*) $g(t) = (4e^{-2t} - e^{-t})\cos(4t - 95^\circ)$.
5. Para cada una de las siguientes funciones, determine tanto la frecuencia compleja **s** como **s***: (*a*) $7e^{-9t}\,\text{sen}(100t + 9^\circ)$; (*b*) $\cos 9t$; (*c*) $2\,\text{sen } 45t$; (*d*) $e^{7t}\cos 7t$.
6. Use constantes reales A, B, θ, ϕ, etc. para construir la forma general de una función real del tiempo caracterizada por los siguientes componentes de frecuencia: (*a*) $10 - j3\ \text{s}^{-1}$; (*b*) $0.25\ \text{s}^{-1}$; (*c*) $0, 1, -j, 1 + j$ (todas s^{-1}).
7. Las siguientes fuentes de tensión $Ae^{Bt}\cos(Ct + \theta)$ se conectan (una cada vez) a una resistencia de 280 Ω. Calcule la corriente que resulta en $t = 0$, 0.1 y 0.5 s, observando la convención del signo pasivo: (*a*) $A = 1$ V, $B = 0.2$ Hz, $C = 0$, $\theta = 45^\circ$; (*b*) $A = 285$ mV, $B = -1$ Hz, $C = 2$ rad/s, $\theta = -45^\circ$.
8. El teléfono móvil de su vecino interfiere con el sistema de bocinas de la laptop de usted cada vez que el teléfono se está conectando a la red local. Al conectar un osciloscopio a la clavija de su computadora, usted observa una forma de tensión que se puede describir por una frecuencia compleja $\mathbf{s} = -1 + j200\pi\ \text{s}^{-1}$. (*a*) ¿Qué puede usted deducir acerca de los movimientos de su vecino? (*b*) La parte imaginaria de la frecuencia compleja comienza a disminuir repentinamente. Modifique su deducción según corresponda.

9. Calcule la parte real de cada una de las siguientes funciones complejas: (*a*) $\mathbf{v}(t) = 9e^{-j4t}$ V; (*b*) $\mathbf{v}(t) = 12 - j9$ V; (*c*) $5 \cos 100t - j43 \text{ sen } 100t$ V; (*d*) $(2 + j)e^{j3t}$ V.

10. Su nuevo asistente ha medido la señal que proviene de un equipo de prueba y ha escrito $v(t) = \mathbf{V}_x e^{(-2+j60)t}$, donde $\mathbf{V}_x = 8 - j100$ V. (*a*) Hay un término faltante. ¿Cuál es y cómo puede usted saber que está faltando? (*b*) ¿Cuál es la frecuencia compleja de la señal? (*c*) ¿Cuál es la importancia del hecho de que $\text{Im}\{\mathbf{V}_x\} > \text{Re}\{\mathbf{V}_x\}$? (*d*) ¿Cuál es la importancia de que $|\text{Re}\{\mathbf{s}\}| < |\text{Im}\{\mathbf{s}\}|$?

14.2 Función forzada senoidal amortiguada

11. Exprese la tensión en el dominio del tiempo $v(t)$ que corresponde a la tensión $\mathbf{V} = 19\underline{/84^\circ}$ V si $\mathbf{s}$ es igual a (*a*) 5 s^{-1}; (*b*) 0; (*c*) $-4 + j$ s^{-1}.

12. Para el circuito de la figura 14.10, la fuente de tensión se elige de tal manera que se puede representar por la función en el dominio de la frecuencia compleja $\mathbf{V}e^{\mathbf{s}t}$, con $\mathbf{V} = 2.5\underline{/-20^\circ}$ V y $\mathbf{s} = -1 + j100$ s^{-1}. Calcule (*a*) $\mathbf{s}^*$; (*b*) $v(t)$, la representación de la fuente de tensión en el dominio del tiempo; (*c*) la corriente $i(t)$.

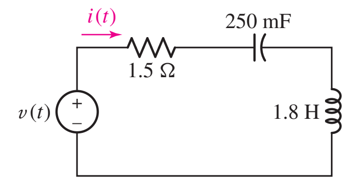


FIGURA 14.10

13. Respecto al circuito representado en la figura 14.10, determine la tensión en el dominio del tiempo $v(t)$ que corresponde a una corriente en el dominio de la frecuencia $\mathbf{i}(t) = 5\underline{/30^\circ}$ A para una frecuencia compleja de (*a*) $\mathbf{s} = -2 + j2$ s^{-1}, (*b*) $\mathbf{s} = -3 + j$ s^{-1}.

14. Para el circuito representado en la figura 14.11, considere $\mathbf{s} = -200 + j150$ s^{-1}. Determine la relación de las tensiones en el dominio de la frecuencia $\mathbf{V}_2$ y $\mathbf{V}_1$ que corresponden a $v_2(t)$ y $v_1(t)$, respectivamente.

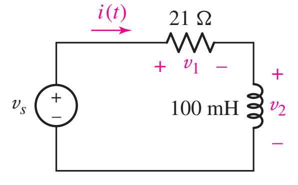


FIGURA 14.11

15. Si la frecuencia compleja que describe el circuito de la figura 14.11 es $\mathbf{s} = -150 + j100$ s^{-1}, determine la tensión en el dominio del tiempo que corresponde a una tensión en el dominio de la frecuencia $\mathbf{V}_2 = 5\underline{/-25^\circ}$ V.

16. Calcule la tensión en el dominio del tiempo v en el circuito de la figura 14.12 si la representación en el dominio de la frecuencia de la fuente de corriente es $2.3\underline{/5^\circ}$ A a una frecuencia compleja de $\mathbf{s} = -1 + j2$ s^{-1}.

17. El circuito de la figura 14.12 funciona durante un largo periodo sin interrupción. La tensión en el dominio de la frecuencia que se presenta entre las terminales de los tres elementos se puede representar por $1.8\underline{/75^\circ}$ V a una frecuencia compleja de $\mathbf{s} = -2 + j1.5$ s^{-1}. Determine la corriente en el dominio del tiempo i_s.

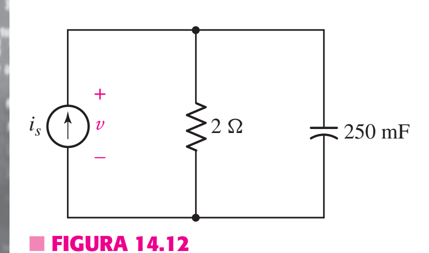


FIGURA 14.12

18. El circuito de la figura 14.13 está accionado por $v_S(t) = 10 \cos 5t$ V. (*a*) Determine la frecuencia compleja de la fuente. (*b*) Determine la representación de la fuente en el dominio de la frecuencia: (*c*) Calcule la representación en el dominio de la frecuencia de i_x. (*d*) Obtenga la expresión en el dominio del tiempo para i_x.

19. La corriente en el dominio de la frecuencia $\mathbf{I}_x$ que fluye a través de la resistencia de 2.2 Ω de la figura 14.13 se puede representar como $2\underline{/10^\circ}$ A con una frecuencia compleja de $\mathbf{s} = -1 + j0.5$ s^{-1}. Determine la tensión en el dominio del tiempo v_s.

20. Sea $i_{s1} = 20e^{-3t} \cos 4t$ A e $i_{s2} = 30e^{-3t} \text{ sen } 4t$ A en el circuito de la figura 14.14. (*a*) Trabaje en el dominio de la frecuencia para determinar $\mathbf{V}_x$. (*b*) Calcule $v_x(t)$.

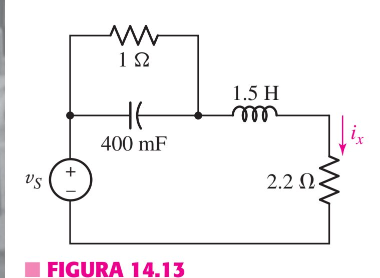


FIGURA 14.13

FIGURA 14.14

14.3 Definición de la transformada de Laplace

21. Calcule, con la ayuda de la ecuación [14] (y mostrando los pasos intermedios), la transformada de Laplace de las siguientes expresiones: (*a*) $2.1u(t)$; (*b*) $2u(t-1)$; (*c*) $5u(t-2)-2u(t)$; (*d*) $3u(t-b)$, donde $b>0$.

22. Utilice la integral de la transformada de Laplace unilateral (incluyendo explícitamente los pasos intermedios) para calcular las expresiones en el dominio de **s** que correspondan a las siguientes expresiones: (*a*) $5u(t-6)$; (*b*) $2e^{-t}u(t)$; (*c*) $2e^{-t}u(t-1)$; (*d*) e^{-2t} sen $5t\,u(t)$.

23. Con la ayuda de la ecuación [14], y mostrando los pasos intermedios adecuados, calcule la transformada de Laplace unilateral de las siguientes expresiones:
(*a*) $(t-1)u(t-1)$; (*b*) $t2u(t)$; (*c*) sen $2tu(t)$; (*d*) cos $100t\,u(t)$.

24. La transformada de Laplace de $tf(t)$ considerando $\mathscr{L}\{f(t)\}=\mathbf{F}(\mathbf{s})$, está dada por $-\dfrac{d}{d\mathbf{s}}\mathbf{F}(\mathbf{s})$.
Pruebe esto comparando el resultado predicho con el hallado usando directamente la ecuación [14] para (*a*) $tu(t)$; (*b*) $t^2u(t)$; (*c*) $t^3u(t)$; (*d*) $te^{-t}u(t)$.

14.4 Transformadas de Laplace de funciones de tiempo simples

25. Para las siguientes funciones, especifique el rango de σ_0 para el que existe la transformada de Laplace unilateral: (*a*) $t+4$; (*b*) $(t+1)\,(t-2)$; (*c*) $e^{-t/2}u(t)$; (*d*) sen $10t\,u(t+1)$.

26. Demuestre, con ayuda de la ecuación [14], que $\mathscr{L}\{f(t)+g(t)+h(t)\}=\mathscr{L}\{f(t)\}+\mathscr{L}\{g(t)\}+\mathscr{L}\{h(t)\}$.

27. Determine $\mathbf{F}(\mathbf{s})$ si $f(t)$ es igual a (*a*) $3u(t-2)$; (*b*) $3e^{-2t}u(t)+5u(t)$; (*c*) $\delta(t)+u(t)-tu(t)$; (*d*) $5\delta(t)$.

28. Obtenga una expresión para $\mathbf{G}(\mathbf{s})$ si $g(t)$ está dada por (*a*) $[5u(t)]^2-u(t)$; (*b*) $2u(t)-2u(t-2)$; (*c*) $tu(2t)$; (*d*) $2e^{-t}u(t)+3u(t)$.

29. Sin recurrir a la ecuación [15], obtenga una expresión para $f(t)$ si $\mathbf{F}(\mathbf{s})$ está dada por
(*a*) $\dfrac{1}{\mathbf{s}}$; (*b*) $1.55-\dfrac{2}{\mathbf{s}}$; (*c*) $\dfrac{1}{\mathbf{s}+1.5}$; (*d*) $\dfrac{5}{\mathbf{s}^2}+\dfrac{5}{\mathbf{s}}+5$. (Dé una breve explicación de su proceso de solución.)

30. Obtenga una expresión para $g(t)$ sin emplear la integral inversa de la transformada de Laplace, si se sabe que $\mathbf{G}(\mathbf{s})$ es (*a*) $\dfrac{1.5}{(\mathbf{s}+9)^2}$; (*b*) $\dfrac{2}{\mathbf{s}}-0$; (*c*) π; (*d*) $\dfrac{a}{(\mathbf{s}+1)^2}-a,\ a>0$.
(Dé una breve explicación de su proceso de solución para cada expresión.)

31. Evalúe lo siguiente: (*a*) $\delta(t)$ en $t=1$; (*b*) $5\delta\,(t+1)+u\,(t+1)$ en $t=0$; (*c*) $\int_{-1}^{2}\delta(t)\,dt$; (*d*) $3-\int_{-1}^{2}2\delta(t)\,dt$.

32. Evalúe lo siguiente: (*a*) $[\delta(2t)]^2$ en $t=1$; (*b*) $2\delta(t-1)+u(-t+1)$ en $t=0$;
(*c*) $\frac{1}{3}\int_{-0.001}^{0.003}\delta(t)\,dt$; (*d*) $\overline{\left[\frac{1}{2}\int_0^2\delta(t-1)\,dt|\right]^2}^{\,1}$.

33. Evalúe las siguientes expresiones en $t=0$:
(*a*) $\int_{-\infty}^{+\infty}2\delta(t-1)\,dt$; (*b*) $\dfrac{\int_{-\infty}^{+\infty}\delta(t+1)\,dt}{u(t+1)}$; (*c*) $\dfrac{\sqrt{3\int_{-\infty}^{+\infty}\delta(t-2)\,dt}}{[u(1-t)]^3}-\sqrt{u(t+2)}$;
(*d*) $\left[\dfrac{\int_{-\infty}^{+\infty}\delta(t-1)\,dt}{\int_{-\infty}^{+\infty}\delta(t+1)\,dt}\Bigg|\right]^2$.

34. Evalúe lo siguiente:
(*a*) $\int_{-\infty}^{+\infty}e^{-100}\delta\left(t-\dfrac{1}{5}\right)dt$; (*b*) $\int_{-\infty}^{+\infty}4t\delta(t-2)\,dt$; (*c*) $\int_{-\infty}^{+\infty}4t^2\delta(t-1.5)\,dt$;
(*d*) $\dfrac{\int_{-\infty}^{+\infty}(4-t)\delta(t-1)\,dt}{\int_{-\infty}^{+\infty}(4-t)\delta(t+1)\,dt}$.

14.5 Técnicas de la transformada inversa

35. Determine la transformada inversa de $\mathbf{F(s)}$ igual a (*a*) $5 + \dfrac{5}{\mathbf{s}^2} - \dfrac{5}{(\mathbf{s}+1)}$; (*b*) $\dfrac{1}{\mathbf{s}} + \dfrac{5}{(0.1\mathbf{s}+4)} - 3$; (*c*) $-\dfrac{1}{2\mathbf{s}} + \dfrac{1}{(0.5\mathbf{s})^2} + \dfrac{4}{(\mathbf{s}+5)(\mathbf{s}+5)} + 2$; (*d*) $\dfrac{4}{(\mathbf{s}+5)(\mathbf{s}+5)} + \dfrac{2}{\mathbf{s}+1} + \dfrac{1}{\mathbf{s}+3}$.

36. Obtenga una expresión para $g(t)$ si $\mathbf{G(s)}$ está dada por (*a*) $\dfrac{3(\mathbf{s}+1)}{(\mathbf{s}+1)^2} + \dfrac{2\mathbf{s}}{\mathbf{s}^2} - \dfrac{1}{(\mathbf{s}+2)^2}$; (*b*) $-\dfrac{10}{(\mathbf{s}+3)^3}$; (*c*) $19 - \dfrac{8}{(\mathbf{s}+3)^2} + \dfrac{18}{\mathbf{s}^2+6\mathbf{s}+9}$.

37. Reconstruya la función en el dominio del tiempo si su transformada es (*a*) $\dfrac{\mathbf{s}}{\mathbf{s}(\mathbf{s}+2)}$; (*b*) 1; (*c*) $3\dfrac{\mathbf{s}+2}{(\mathbf{s}^2+2\mathbf{s}+4)}$; (*d*) $4\dfrac{\mathbf{s}}{2\mathbf{s}+3}$.

38. Determine la transformada inversa de $\mathbf{V(s)}$ igual a (*a*) $\dfrac{\mathbf{s}^2+2}{\mathbf{s}} + 1$; (*b*) $\dfrac{\mathbf{s}+8}{\mathbf{s}} + \dfrac{2}{\mathbf{s}^2}$; (*c*) $\dfrac{\mathbf{s}+1}{\mathbf{s}(\mathbf{s}+2)} + \dfrac{2\mathbf{s}^2-1}{\mathbf{s}^2}$; (*d*) $\dfrac{\mathbf{s}^2+4\mathbf{s}+4}{\mathbf{s}}$.

39. Obtenga la expresión en el dominio del tiempo que corresponda a cada una de las siguientes funciones en el dominio de $\mathbf{s}$: (*a*) $2\dfrac{3\mathbf{s}+\frac{1}{2}}{\mathbf{s}^2+3\mathbf{s}}$; (*b*) $7 - \dfrac{\mathbf{s}+\frac{1}{\mathbf{s}}}{\mathbf{s}^2+3\mathbf{s}+1}$; (*c*) $\dfrac{2}{\mathbf{s}^2} + \dfrac{1}{\mathbf{s}} + \dfrac{\mathbf{s}+2}{\left(\frac{\mathbf{s}}{2}\right)^2+4\mathbf{s}+6}$; (*d*) $\dfrac{2}{(\mathbf{s}+1)(\mathbf{s}+1)}$; (*e*) $\dfrac{14}{(\mathbf{s}+1)^2(\mathbf{s}+4)(\mathbf{s}+5)}$.



40. Encuentre la transformada inversa de Laplace de lo siguiente: (*a*) $\dfrac{1}{\mathbf{s}^2+9\mathbf{s}+20}$; (*b*) $\dfrac{4}{\mathbf{s}^3+18\mathbf{s}^2+17\mathbf{s}} + \dfrac{1}{\mathbf{s}}$; (*c*) $(0.25)\dfrac{1}{\left(\frac{\mathbf{s}}{2}\right)^2+1.75\mathbf{s}+2.5}$; (*d*) $\dfrac{3}{\mathbf{s}(\mathbf{s}+1)(\mathbf{s}+4)(\mathbf{s}+5)(\mathbf{s}+2)}$. (*e*) Verifique sus respuestas con MATLAB.



41. Determine la transformada inversa de Laplace de cada una de las siguientes expresiones en el dominio de $\mathbf{s}$: (*a*) $\dfrac{1}{(\mathbf{s}+2)^2(\mathbf{s}+1)}$; (*b*) $\dfrac{\mathbf{s}}{(\mathbf{s}^2+4\mathbf{s}+4)(\mathbf{s}+2)}$; (*c*) $\dfrac{8}{\mathbf{s}^3+8\mathbf{s}^2+21\mathbf{s}+18}$. (*d*) Verifique sus respuestas con MATLAB.

42. Dadas las siguientes expresiones en el dominio de $\mathbf{s}$, determine las funciones correspondientes en el dominio del tiempo: (*a*) $\dfrac{1}{3\mathbf{s}} - \dfrac{1}{2\mathbf{s}+1} + \dfrac{3}{\mathbf{s}^3+8\mathbf{s}^2+16\mathbf{s}} - 1$; (*b*) $\dfrac{1}{3\mathbf{s}+5} + \dfrac{3}{\mathbf{s}^3/8+0.25\mathbf{s}^2}$; (*c*) $\dfrac{2\mathbf{s}}{(\mathbf{s}+a)^2}$.

43. Calcule $\mathscr{L}^{-1}\{\mathbf{G(s)}\}$ si $\mathbf{G(s)}$ está dada por (*a*) $\dfrac{3\mathbf{s}}{(\mathbf{s}/2+2)^2(\mathbf{s}+2)}$; (*b*) $3 - 3\dfrac{\mathbf{s}}{(2\mathbf{s}^2+24\mathbf{s}+70)(\mathbf{s}+5)}$; (*c*) $2 - \dfrac{1}{\mathbf{s}+100} + \dfrac{\mathbf{s}}{\mathbf{s}^2+100}$; (*d*) $\mathscr{L}\{tu(2t)\}$.



44. Obtenga la expresión en el dominio del tiempo que corresponda a las siguientes funciones en el dominio de $\mathbf{s}$: (*a*) $\dfrac{\mathbf{s}}{(\mathbf{s}+2)^3}$; (*b*) $\dfrac{4}{(\mathbf{s}+1)^4(\mathbf{s}+1)^2}$; (*c*) $\dfrac{1}{\mathbf{s}^2(\mathbf{s}+4)^2(\mathbf{s}+6)^3} - \dfrac{2\mathbf{s}^2}{\mathbf{s}} + 9$. (*d*) Verifique sus soluciones con MATLAB.

14.6 Teoremas fundamentales de la transformada de Laplace

45. Efectúe la transformada de Laplace de las siguientes ecuaciones: (*a*) $5\,di/dt - 7\,d^2i/dt^2 + 9i = 4$; (*b*) $m\dfrac{d^2p}{dt^2} + \mu_f\dfrac{dp}{dt} + kp(t) = 0$, la ecuación que describe la respuesta "sin fuerza" de un sistema absorbedor de choques simple;

(*c*) $\frac{d\Delta n_p}{dt} = -\frac{\Delta n_p}{\tau} + G_L$, con $\tau =$ constante, la cual describe la tasa de recombinación de electrones en exceso (Δn_p) en silicio tipo p, bajo iluminación óptica (G_L es una constante proporcional a la intensidad de la luz).

46. Respecto al circuito representado en la figura 14.15, la tensión inicial entre las terminales del capacitor es $v(0^-) = 1.5$ V, y la fuente de corriente es $\mathbf{I}_s = 700\ u\ (t)$ mA. (*a*) Escriba la ecuación diferencial que resulta de la LCK, en términos de la tensión de nodo $v(t)$. (*b*) Tome la transformada de Laplace de la ecuación diferencial. (*c*) Determine la representación en el dominio de la frecuencia de la tensión de nodo. (*d*) Despeje la tensión en el dominio del tiempo $v(t)$.

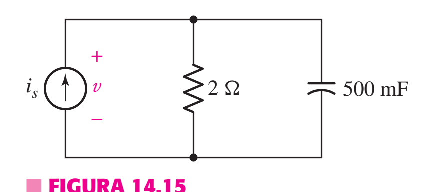


FIGURA 14.15

47. Para el circuito de la figura 14.15, si $\mathbf{I}_s = \frac{2}{\mathbf{s}+1}$ mA, (*a*) escriba la ecuación de nodo en el dominio del tiempo en términos de $v(t)$; (*b*) despeje $\mathbf{V}(\mathbf{s})$; (*c*) determine la tensión en el dominio del tiempo $v(t)$.

48. La fuente de tensión en el circuito de la figura 14.4 se reemplaza por la fuente cuyo equivalente en el dominio de **s** es $\frac{2}{\mathbf{s}} - \frac{1}{\mathbf{s}+1}$V. La condición inicial no cambia. (*a*) Escriba la ecuación LVK en el dominio de **s** en términos de $\mathbf{I}(\mathbf{s})$. (*b*) Despeje $i(t)$.

49. Para el circuito de la figura 14.16, $v_s(t) = 2u(t)$ V y el capacitor inicialmente almacena energía cero. Escriba la ecuación en el dominio del tiempo del lazo en términos de la corriente $i(t)$. (*b*) Obtenga la representación en el dominio de **s** de esta ecuación integral. (*c*) Despeje $i(t)$.

50. La representación en el dominio de **s** de la fuente de tensión en la figura 14.16 es $\mathbf{V}_s(\mathbf{s}) = \frac{2}{\mathbf{s}+1}$V. La tensión inicial entre las terminales del capacitor, definido usando la convención del signo pasivo en términos de la corriente i, es de 4.5 V. (*a*) Escriba la ecuación integral en el dominio del tiempo que resulta de la aplicación de la LVK. (*b*) Despejando primero $\mathbf{I}(\mathbf{s})$, determine la corriente en el dominio del tiempo $i(t)$.

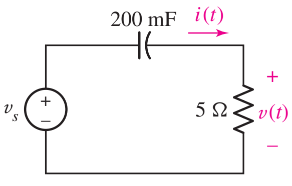




FIGURA 14.16

51. Si la fuente de corriente de la figura 14.17 está dada por 450 $u(t)$ mA e $i_x(0) = 150$ mA, trabaje inicialmente en el dominio de **s** para obtener una expresión para $v(t)$ que sea válida para $t > 0$.

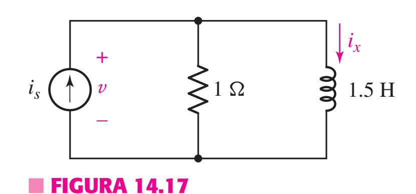


FIGURA 14.17

52. Obtenga, de manera formal, una expresión en el dominio de **s** que corresponda a la forma de onda graficada en la figura 14.18.

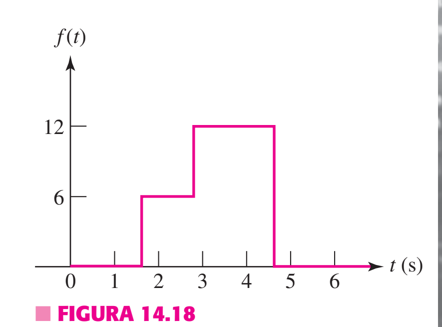


FIGURA 14.18

53. Aplique la prueba de Routh a las funciones de sistema siguientes y establezca si el sistema es *estable* o *inestable*:

$$(a)\ \mathbf{H}(\mathbf{s}) = \frac{\mathbf{s}-500}{\mathbf{s}^3+13\mathbf{s}^2+47\mathbf{s}+35};\ (b)\ \mathbf{H}(\mathbf{s}) = \frac{\mathbf{s}-500}{\mathbf{s}^3+13\mathbf{s}^2+\mathbf{s}+35}.$$

54. Aplique la prueba de Routh a las funciones de sistema siguientes y establezca si el sistema es *estable* o *inestable*, después factorice cada denominador para identificar los polos de $\mathbf{H}(\mathbf{s})$ y verifique la exactitud de la prueba de Routh de estas funciones:

$$(a)\ \mathbf{H}(\mathbf{s}) = \frac{4\mathbf{s}}{\mathbf{s}^2+3\mathbf{s}+8};\ (b)\ \mathbf{H}(\mathbf{s}) = \frac{\mathbf{s}-9}{\mathbf{s}^2+2\mathbf{s}+1}.$$

14.7 Teoremas del valor inicial y del valor final

55. Utilice el teorema del valor inicial para determinar el valor inicial de cada una de las siguientes funciones en el dominio del tiempo: (*a*) $2u(t)$; (*b*) $2e^{-t}\ u(t)$; (*c*) $u(t-6)$; (*d*) $\cos 5t\ u(t)$.

56. Utilice el teorema del valor inicial para determinar el valor inicial de cada una de las siguientes funciones en el dominio del tiempo: (*a*) $u(t-3)$; (*b*) $2e^{-(t-2)}u(t-2)$; (*c*) $\frac{u(t-2)+[u(t)]^2}{2}$; (*d*) $\text{sen}\,5t\ e^{-2t}u(t)$.

57. Use el teorema del valor final (si es adecuado) para determinar $f(\infty)$ para

$$(a)\ \frac{1}{\mathbf{s}+2} - \frac{2}{\mathbf{s}};\ (b)\ \frac{2\mathbf{s}}{(\mathbf{s}+2)(\mathbf{s}+1)};\ (c)\ \frac{1}{(\mathbf{s}+2)(\mathbf{s}+4)} + \frac{2}{\mathbf{s}};$$

$$(d)\ \frac{1}{(\mathbf{s}^2+\mathbf{s}-6)(\mathbf{s}+9)}.$$

58. Sin recurrir a $f(t)$, determine $f(0^+)$ y $f(\infty)$ (o demuestre que no existen) para cada una de las siguientes expresiones en el dominio de **s**: *a*) $\dfrac{1}{\mathbf{s}+18}$; (*b*) $10\left(\dfrac{1}{\mathbf{s}^2}+\dfrac{3}{\mathbf{s}}\right)$; (*c*) $\dfrac{\mathbf{s}^2-4}{\mathbf{s}^3+8\mathbf{s}^2+4\mathbf{s}}$; (*d*) $\dfrac{\mathbf{s}^2+2}{\mathbf{s}^3+3\mathbf{s}^2+5\mathbf{s}}$.

59. Aplique el teorema del valor inicial o el teorema del valor final, según sea adecuado, para determinar $f(0^+)$ y $f(\infty)$ para las siguiente funciones:
(*a*) $\dfrac{\mathbf{s}+2}{\mathbf{s}^2+8\mathbf{s}+4}$; (*b*) $\dfrac{1}{\mathbf{s}^2(\mathbf{s}+4)^2(\mathbf{s}+6)^3}-\dfrac{2\mathbf{s}^2}{\mathbf{s}}+9$; (*c*) $\dfrac{4\mathbf{s}^2+1}{(\mathbf{s}+1)^2(\mathbf{s}+2)^2}$.

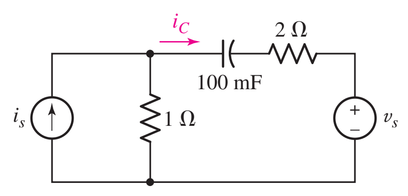
60. Determine cuáles de las siguientes funciones son adecuadas para aplicar el teorema del valor final:
(*a*) $\dfrac{1}{(\mathbf{s}-1)}$; (*b*) $\dfrac{10}{\mathbf{s}^2-4\mathbf{s}+4}$; (*c*) $\dfrac{13}{\mathbf{s}^3-5\mathbf{s}^2+8\mathbf{s}-6}$;
(*d*) $\dfrac{3}{2\mathbf{s}^3-10\mathbf{s}^2+16\mathbf{s}-12}$.

Ejercicios de integración del capítulo

61. La tensión $v(t) = 8e^{-2t}u(t)$ V se aplica a un dispositivo de dos terminales no identificado. Su asistente le entiende mal y sólo registra la corriente en el dominio de **s** que resulta. Determine qué tipo de elemento es, y su valor, si $\mathbf{I}(\mathbf{s})$ es igual a (*a*) $\dfrac{1}{\mathbf{s}+2}$ A; (*b*) $\dfrac{4}{\mathbf{s}(\mathbf{s}+2)}$ A.

62. (*a*) Cree una función en el dominio de **s**, $\mathbf{F}(\mathbf{s})$, que corresponda a un valor inicial $f(0^-) = 16$ pero tiene un valor final indeterminado. (*b*) Obtenga una expresión para $f(t)$. (*c*) Si esta forma de onda representa la tensión entre las terminales de un capacitor de 2 F, determine la corriente que fluye a través del dispositivo (adopte la convención del signo pasivo).

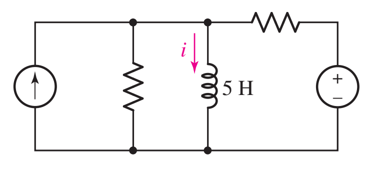
63. Para el circuito de la figura 14.19, sea $i_s(t) = 5u(t)$ A y $v_s(t) = e^{-4t}u(t+1)$ V. Trabajando inicialmente en el dominio de **s**, obtenga una expresión para $i_C(t)$ que sea válida para $t > 0$.



■ **FIGURA 14.19**

64. Con referencia al circuito representado en la figura 14.19 y trabajando en el dominio de **s** para desarrollar una expresión para $\mathbf{I}_C(\mathbf{s})$, determine $i_C(t)$ para $t > 0$ si $i_s(t) = 2u(t+2)$ A y $v_s(t)$ es igual a (*a*) $2u(t)$ V; (*b*) $te^{-t}u(t)$ V.

65. Para el circuito de la figura 14.20, $\mathbf{I}(\mathbf{s}) = 5\dfrac{\mathbf{s}+1}{(\mathbf{s}+1)^2+10^4}$ A. (*a*) Determine el valor inicial de la corriente en el inductor. (*b*) Determine el valor final de la tensión en el inductor, suponiendo que está definido de acuerdo con la convención del signo pasivo.



■ **FIGURA 14.20**

y

G. Clayton y S. Winder, *Operational Amplifiers,* 5a. ed. Amsterdam: Newnes, 2003.

EJERCICIOS

15.1 Z(s) y Y(s)

1. Dibuje un equivalente en el dominio **s** del circuito representado en la figura 15.45 si la única cantidad que interesa es $v(t)$. (*Pista:* Omita la fuente, pero no la ignore.)
2. Para el circuito de la figura 15.46, la única cantidad que interesa es la tensión $v(t)$. Dibuje un circuito equivalente adecuado en el dominio **s**. (*Pista:* Omita la fuente, pero no la ignore.)
3. Para el circuito representado en la figura 15.47, dibuje un equivalente en el dominio **s** y analícelo para obtener un valor para $i(t)$ si $i(0)$ es igual a (*a*) 0; (*b*) -2 A.

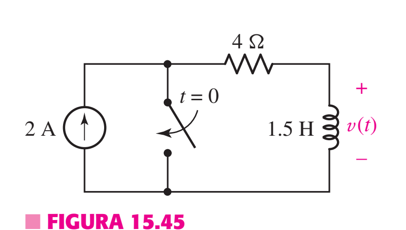


FIGURA 15.45

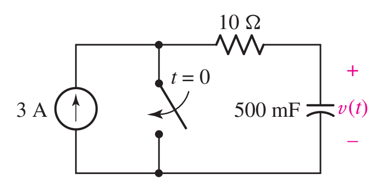


FIGURA 15.46

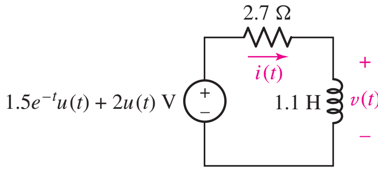


FIGURA 15.47

4. Para el circuito de la figura 15.47, dibuje un equivalente en el dominio **s** y analícelo para obtener un valor para $v(t)$ si $i(0)$ es igual a (*a*) 0; (*b*) 3 A.
5. Con referencia al circuito en el dominio **s** dibujado en la figura 15.48, (*a*) calcule $\mathbf{V}_C(\mathbf{s})$; (*b*) determine $v_C(t)$, $t > 0$; (*c*) dibuje la representación en el dominio de tiempo del circuito.
6. Dibuje todos los equivalentes en el dominio **s** posibles ($t > 0$) del circuito que se muestra en la figura 15.49.
7. Determine la impedancia de entrada $\mathbf{Z}_{ent}(\mathbf{s})$ vista desde las terminales de la red que se representa en la figura 15.50. Exprese su respuesta como la razón de dos polinomios de **s**.

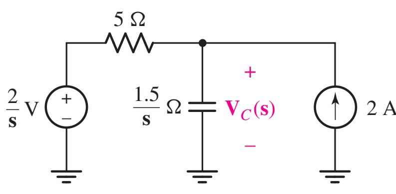


FIGURA 15.48

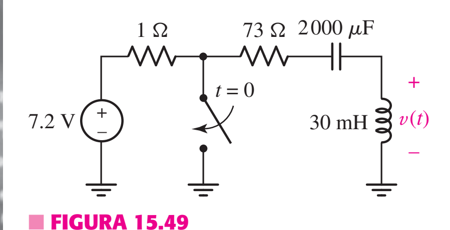


FIGURA 15.49

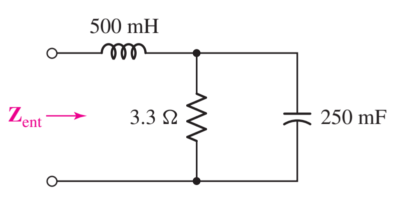


FIGURA 15.50

8. Con referencia a la red de la figura 15.51, obtenga una expresión para la admitancia de entrada $\mathbf{Y}(\mathbf{s})$ como está marcada. Exprese su respuesta como la razón de dos polinomios **s**.
9. Para el circuito de la figura 15.52, (*a*) dibuje ambos circuitos equivalentes en el dominio de **s**. (*b*) elija uno y solucione para $\mathbf{V}(\mathbf{s})$; (*c*) determine $v(t)$.

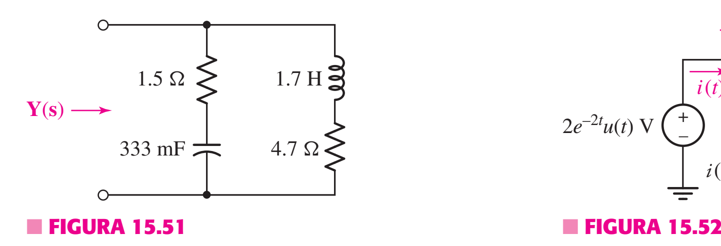


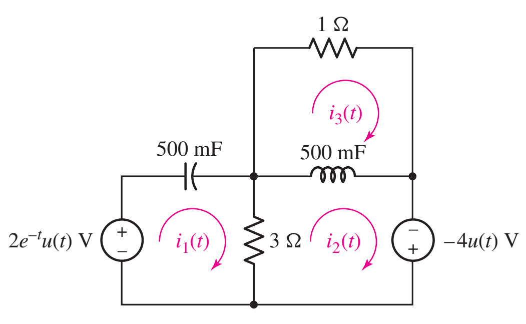
FIGURA 15.51

FIGURA 15.52

10. Determine la impedancia de entrada $1/\mathbf{Y}(\mathbf{s})$ de la red representada en la figura 15.51 si la resistencia de 1.5 Ω se reemplaza por la combinación en paralelo de un capacitor de 100 mF y una resistencia de 1 Ω y la corriente inicial a través del inductor (definida como fluyendo hacia abajo) es de 540 mA.

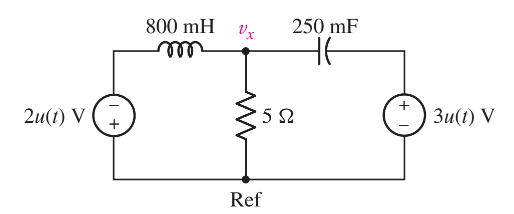
15.2 Análisis nodal y de malla en el dominio s

11. Para el circuito dado en la figura 15.53, (*a*) dibuje el equivalente en el dominio **s**; (*b*) escriba las tres ecuaciones de malla en el dominio **s**; (*c*) determine i_1, i_2 e i_3.



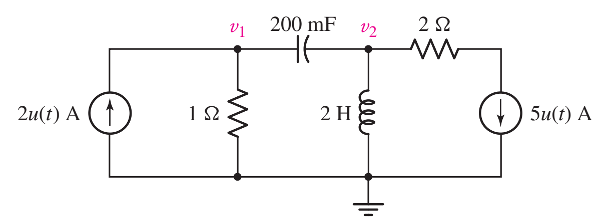
■ **FIGURA 15.53**

12. Reemplace la marca $-4u(t)$ en el circuito de la figura 15.53 por $4e^{-t}u(t)$ V. Calcule i_1, i_2 e i_3 si se sabe que la corriente inicial a través del inductor, $i_2 - i_3$, es igual a 50 mA.
13. Para el circuito que se muestra en la figura 15.54, (*a*) escriba una ecuación nodal en el dominio **s** para $\mathbf{V}_x(\mathbf{s})$; (*b*) resuelva para $v_x(t)$.



■ **FIGURA 15.54**

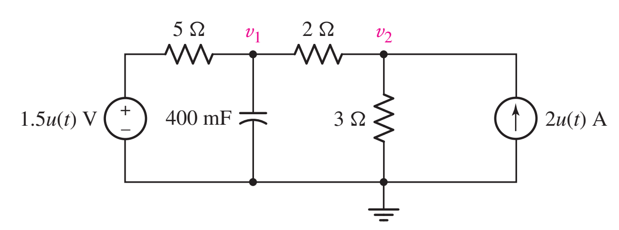
14. Determine v_1 y v_2 para el circuito de la figura 15.55 usando análisis nodal en el dominio **s**.



■ **FIGURA 15.55**

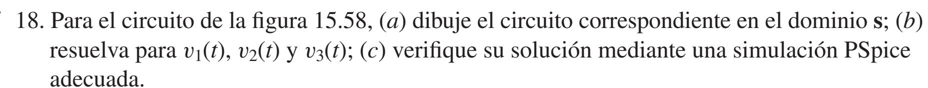
15. La fuente de $2u(t)$ A en la figura 15.55 se reemplaza por una fuente de $4e^{-t}u(t)$ A. Use análisis en el dominio **s** para determinar la potencia disipada por la resistencia de 1 Ω.

16. Calcule la potencia disipada en la resistencia de 3 Ω de la figura 15.56 si $v_1(0^-) = 2$ V.

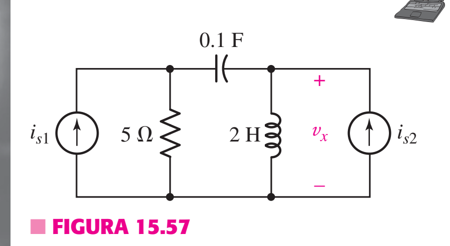


■ **FIGURA 15.56**

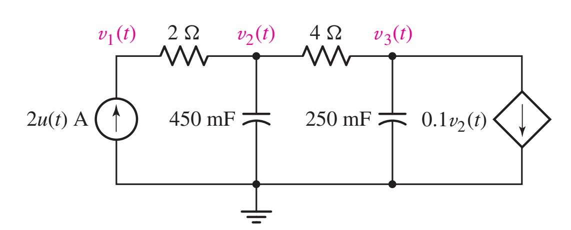
17. Para el circuito que se muestra en la figura 15.57, sea $i_{s1} = 3u(t)$ A e $i_{s2} = 5$ sen $2t$ A. Trabajando inicialmente en el dominio **s**, obtenga una expresión para $v_x(t)$.



18. Para el circuito de la figura 15.58, (*a*) dibuje el circuito correspondiente en el dominio **s**; (*b*) resuelva para $v_1(t)$, $v_2(t)$ y $v_3(t)$; (*c*) verifique su solución mediante una simulación PSpice adecuada.

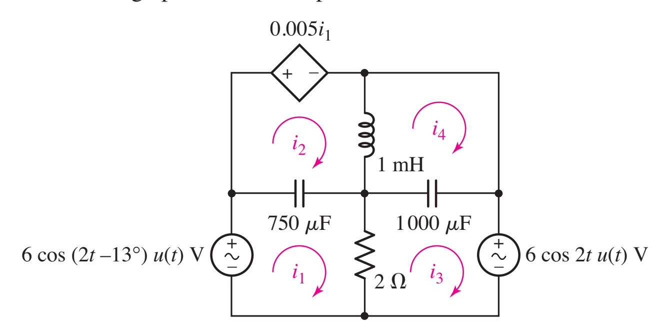


■ **FIGURA 15.57**



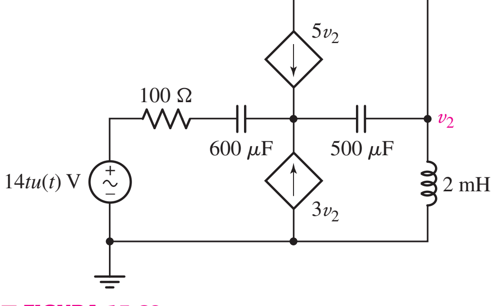
■ **FIGURA 15.58**

19. Determine las corrientes de malla $i_1(t)$ e $i_2(t)$ de la figura 15.59 si la corriente que pasa por el inductor de 1 mH ($i_2 - i_4$) es de 1 A en $t = 0^-$. Verifique que la respuesta se aproxime a la que se obtuvo mediante el análisis fasorial a medida que la respuesta del circuito alcanza, en el largo plazo, el estado permanente.



■ **FIGURA 15.59**

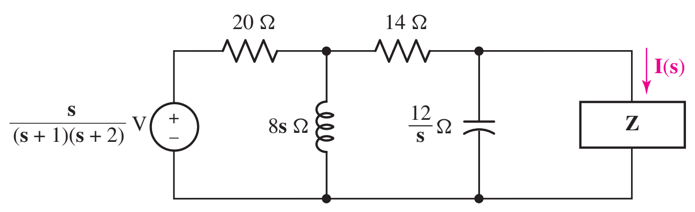
20. Bajo el supuesto de que no se almacena en un principio energía en el circuito de la figura 15.60, determine el valor de v_2 en $t =$: (*a*) 1 ms; (*b*) 100 ms; (*c*) 10 s.



■ **FIGURA 15.60**

15.3 Técnicas adicionales de análisis de circuitos

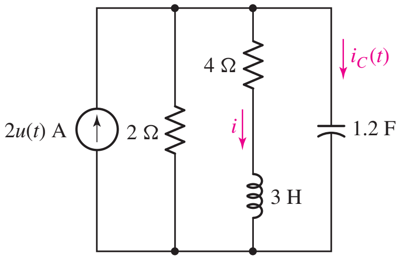
21. Usando sucesivamente transformaciones de fuente, obtenga una expresión en el dominio **s** para el equivalente de Thévenin visto por el elemento marcado **Z** en el circuito de la figura 15.61.



■ **FIGURA 15.61**

22. Calcule **I**(**s**) como está marcado en el circuito de la figura 15.61 si el elemento **Z** tiene una impedancia de (*a*) 2 Ω; (*b*) $\frac{1}{2\mathbf{s}}$; (*c*) $\mathbf{s} + \frac{1}{2\mathbf{s}} + 3\ \Omega$.

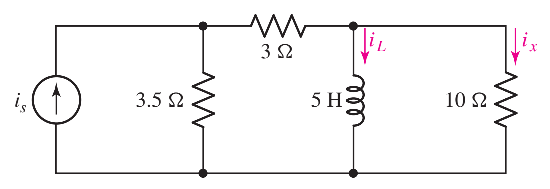
23. Para el circuito que se muestra en la figura 15.62, determine el equivalente Thévenin en el dominio **s** visto por (*a*) la resistencia de 2 Ω; (*b*) la resistencia de 4 Ω; (*c*) el capacitor de 1.2 F; (*d*) la fuente de corriente.



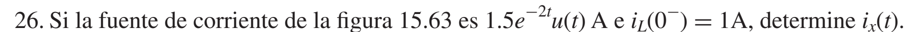
■ **FIGURA 15.62**

24. Calcule las dos corrientes marcadas en el circuito de la figura 15.62.

25. Para el circuito de la figura 15.63, tome $i_s(t) = 5u(t)$ A, y determine (*a*) la impedancia equivalente de Thévenin vista por la resistencia de 10 Ω; (*b*) la corriente a través del inductor $i_L(t)$.

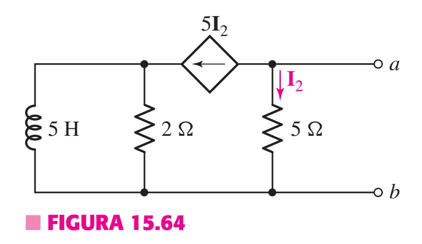


■ **FIGURA 15.63**



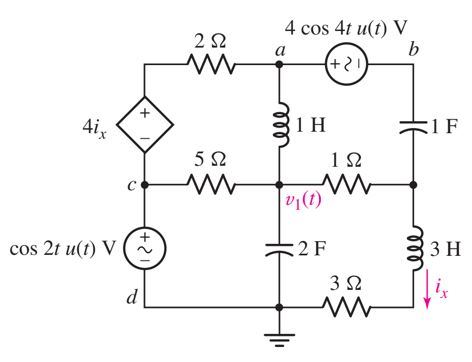
26. Si la fuente de corriente de la figura 15.63 es $1.5e^{-2t}u(t)$ A e $i_L(0^-) = 1$A, determine $i_x(t)$.

27. Para el circuito en el dominio **s** de la figura 15.64, determine el equivalente de Thévenin visto desde las terminales marcadas *a* y *b*.



■ **FIGURA 15.64**

28. (*a*) Use superposición en el dominio **s** para encontrar una expresión para $\mathbf{V}_1(\mathbf{s})$ marcado en la figura 15.65. (*b*) Encuentre $v_1(t)$.



■ **FIGURA 15.65**

29. Si el circuito de la fuente de tensión de la parte superior derecha de la figura 15.65 se abre, determine el equivalente de Thévenin visto desde las terminales marcadas *a* y *b*.

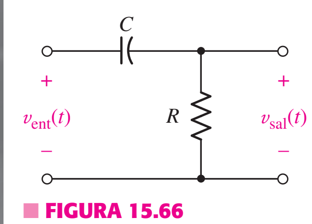
30. Si el circuito de la fuente de tensión de la parte inferior izquierda de la figura 15.65 se abre, determine el equivalente de Thévenin visto desde las terminales marcadas *c* y *d*.

15.4 Polos, ceros y funciones de transferencia

31. Determine los polos y los ceros de las siguientes funciones en el dominio **s**:
(*a*) $\dfrac{\mathbf{s}}{\mathbf{s}+12.5}$; (*b*) $\dfrac{\mathbf{s}(\mathbf{s}+1)}{(\mathbf{s}+5)(\mathbf{s}+3)}$; (*c*) $\dfrac{\mathbf{s}+4}{\mathbf{s}^2+8\mathbf{s}+7}$; (*d*) $\dfrac{\mathbf{s}^2-\mathbf{s}-2}{3\mathbf{s}^3+24\mathbf{s}^2+21\mathbf{s}}$.

32. Use medios adecuados para determinar los polos y los ceros de
(*a*) $\mathbf{s}+4$; (*b*) $\dfrac{2\mathbf{s}}{\mathbf{s}^2-8\mathbf{s}+16}$; (*c*) $\dfrac{4}{\mathbf{s}^3+8\mathbf{s}+7}$; (*d*) $\dfrac{\mathbf{s}-5}{\mathbf{s}^3-7\mathbf{s}+6}$.

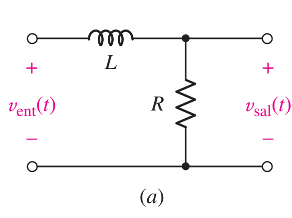
33. Considere las siguientes expresiones y determine las frecuencias críticas de cada una:
(*a*) $5+\mathbf{s}^{-1}$; (*b*) $\dfrac{\mathbf{s}(\mathbf{s}+1)(\mathbf{s}+4)}{(\mathbf{s}+5)(\mathbf{s}+3)^2}$; (*c*) $\dfrac{1}{\mathbf{s}^2+4}$; (*d*) $\dfrac{0.5\mathbf{s}^2-18}{\mathbf{s}^2+1}$.

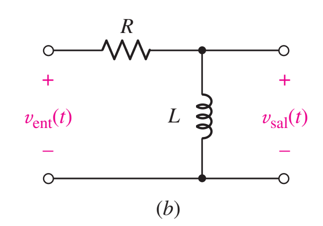


■ FIGURA 15.66

34. Para la red representada esquemáticamente en la figura 15.66, (*a*) escriba la función de transferencia $\mathbf{H}(\mathbf{s}) \equiv \mathbf{V}_{sal}(\mathbf{s})/\mathbf{V}_{ent}(\mathbf{s})$; (*b*) determine los polos y ceros de $\mathbf{H}(\mathbf{s})$.

35. Para cada una de las dos redes representadas esquemáticamente en la figura 15.67, (*a*) escriba la función de transferencia $\mathbf{H}(\mathbf{s}) \equiv \mathbf{V}_{sal}(\mathbf{s})/\mathbf{V}_{ent}(\mathbf{s})$; (*b*) determine los polos y ceros de $\mathbf{H}(\mathbf{s})$.





■ FIGURA 15.67

100 Ω
$\frac{25}{\mathbf{s}}$ Ω
$\mathbf{Z}_{ent}(\mathbf{s})$ ⟶
50**s** Ω
75 Ω

■ FIGURA 15.68

36. Determine las frecuencias críticas de $\mathbf{Z}_{ent}$ definida en la figura 15.50.

37. Especifique los polos y ceros de $\mathbf{Y}(\mathbf{s})$ definida por la figura 15.51.

38. Si se encuentra que una red tiene la función de transferencia $\mathbf{H}(\mathbf{s}) = \dfrac{\mathbf{s}}{\mathbf{s}^2+8\mathbf{s}+7}$,
determine la tensión de salida en el dominio **s** para $v_{ent}(t)$ igual a (*a*) $3u(t)$ V; (*b*) $25e^{-2t}u(t)$ V; (*c*) $4u(t+1)$ V; (*d*) 2 sen $5t\,u(t)$ V.

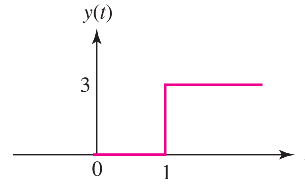
39. Se sabe que una red dada se caracteriza por la función de transferencia $\mathbf{H}(\mathbf{s}) = \mathbf{s}+1/(\mathbf{s}^2+23\mathbf{s}+60)$. Determine las frecuencias críticas de la salida si la entrada es (*a*) $2u(t)+4\delta(t)$; (*b*) $-5e^{-t}u(t)$; (*c*) $4te^{-2t}u(t)$; (*d*) $5\sqrt{2}e^{-10t}\cos 5t\,u(t)$ V.

40. Para la red representada en la figura 15.68, determine las frecuencias críticas de $\mathbf{Z}_{ent}(\mathbf{s})$.

15.5 Convolución

41. Con referencia a la figura 15.69, use la ecuación [11] para obtener $x(t) * y(t)$.





■ FIGURA 15.69

42. Con respecto a las funciones $x(t)$ y $y(t)$ como se grafican en la figura 15.69, use la ecuación [11] para obtener (*a*) $x(t) * x(t)$; (*b*) $y(t) * \delta(t)$.

43. Use técnicas de convolución gráfica para determinar $f * g$ si $f(t) = 5u(t)$ y $g(t) = 2u(t) - 2u(t-2) + 2u(t-4) - 2u(t-6)$.

44. Sea $h(t) = 2e^{-3t}u(t)$ y $x(t) = u(t) - \delta(t)$. Encuentre $y(t) = h(t) * x(t)$ (*a*) usando convolución en el dominio del tiempo; (*b*) encontrando $\mathbf{H(s)}$ y $\mathbf{X(s)}$ y luego obteniendo $\mathscr{L}^{-1}\{\mathbf{H(s)X(s)}\}$.

45. (*a*) Determine la respuesta al impulso $h(t)$ en la red que se muestra en la figura 15.70. (*b*) Utilice la convolución para determinar $v_o(t)$ si $v_{ent}(t) = 8u(t)$ V.

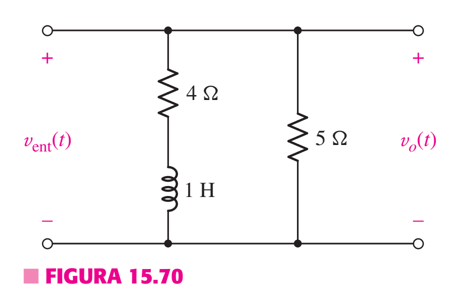


FIGURA 15.70

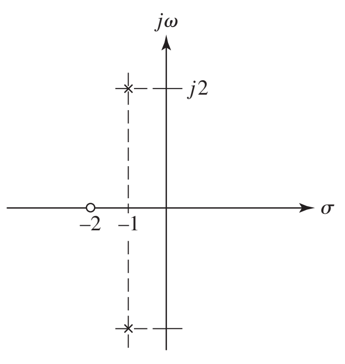


FIGURA 15.71

15.6 Plano de frecuencia compleja


46. Una resistencia de 2 Ω se coloca en serie con un capacitor de 250 mF. Grafique la magnitud de la impedancia equivalente como función de (*a*) σ; (*b*) ω; (*c*) σ y ω, usando un procedimiento tipo hoja elástica. (*d*) Verifique sus soluciones usando MATLAB.


47. Grafique la magnitud de $\mathbf{Z(s)} = \mathbf{s}^2 + \mathbf{s}$ como función de (*a*) σ; (*b*) ω; (*c*) σ y ω, usando un procedimiento tipo hoja elástica. (*d*) Verifique sus soluciones usando MATLAB.

48. Grafique los polos y ceros de cada una de las siguientes expresiones:

$$(a)\ \frac{\mathbf{s}(\mathbf{s}+4)}{(\mathbf{s}+5)(\mathbf{s}+2)};\ (b)\ \frac{\mathbf{s}-1}{\mathbf{s}^2+8\mathbf{s}+7};\ (c)\ \frac{\mathbf{s}^2+1}{\mathbf{s}(\mathbf{s}^2+10\mathbf{s}+16)};\ (d)\ \frac{5}{\mathbf{s}^2+2\mathbf{s}+5}.$$

49. Los polos y ceros de una función de transferencia dada $\mathbf{H(s)}$ se muestra en la figura 15.71 parcialmente etiquetados. Obtenga una expresión para $\mathbf{H(s)}$ si $\mathbf{H}(0)$ es igual a (*a*) 1; (*b*) -5. (*c*) ¿Se espera que el sistema $\mathbf{H(s)}$ sea estable o inestable? *Explique*.

50. La red de tres elementos que se muestra en la figura 15.72 tiene una impedancia de entrada $\mathbf{Z}_A(\mathbf{s})$ que tiene un cero en $\mathbf{s} = -10 + j0$. Si se coloca una resistencia de 20 Ω en serie con la red, el cero de la nueva impedancia se corre a $\mathbf{s} = -3.6 + j0$. Calcule R y C.

51. Sea $\mathbf{H(s)} = 100(\mathbf{s}+2)/(\mathbf{s}^2 + 2\mathbf{s} + 5)$ y: (*a*) muestre la gráfica de polos y ceros correspondientes a $\mathbf{H(s)}$; (*b*) determine $\mathbf{H}(j\omega)$; (*c*) deduzca $|\mathbf{H}(j\omega)|$; (*d*) dibuje $|\mathbf{H}(j\omega)|$ contra ω; (*e*) encuentre $\omega_{máx}$, la frecuencia a la que $|\mathbf{H}(j\omega)|$ es máximo.

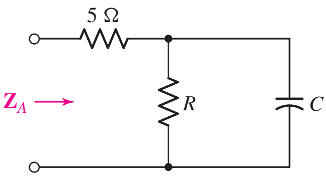


FIGURA 15.72

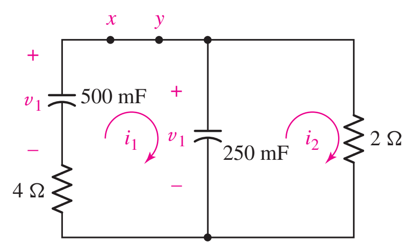


FIGURA 15.73

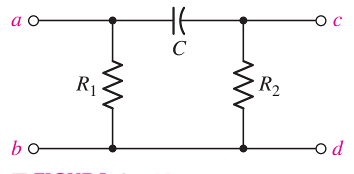


FIGURA 15.74

15.7 Respuesta natural y el plano s

52. Determine expresiones para $i_1(t)$ e $i_2(t)$ para el circuito de la figura 15.73, suponiendo $v_1(0^-) = 2$ V y $v_2(0^-) = 0$ V.

53. El capacitor de 250 mF en el circuito de la figura 15.73 se reemplaza por un inductor de 2 H. Si $v_1(t) = 0$ V y $i_1(0^-) - i_2(0^-) = 1$ A, obtenga una expresión para $i_2(t)$.

54. En la red de la figura 15.74, una fuente de corriente $i_x(t) = 2\,u(t)$ A se conecta entre las terminales c y d de manera que la flecha de la fuente señale hacia arriba. Determine las frecuencias naturales presentes en la tensión $v_{ab}(t)$ que resulta.

55. Con referencia al circuito que se muestra en la figura 15.75, sea $i_1(0^-) = 1$ A y $i_2(0^-) = 0$. (*a*) Determine los polos de $\mathbf{I}_{ent}(\mathbf{s})/\mathbf{V}_{ent}(\mathbf{s})$; (*b*) use esta información para obtener expresiones para $i_1(t)$ e $i_2(t)$.

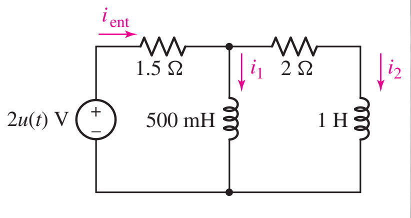


FIGURA 15.75

15.8 Técnica para sintetizar la razón de tensión $\mathbf{H(s)} = \mathbf{V}_{sal}/\mathbf{V}_{ent}$


56. Diseñe un circuito que produzca la función de transferencia $\mathbf{H}(\mathbf{s}) = \mathbf{V}_{sal}/\mathbf{V}_{ent}$ igual a

$$(a)\ 5(\mathbf{s}+1);\ (b)\ \frac{5}{(\mathbf{s}+1)};\ (c)\ 5\frac{\mathbf{s}+1}{\mathbf{s}+2}.$$


57. Diseñe un circuito que produzca la función de transferencia $\mathbf{H}(\mathbf{s}) = \mathbf{V}_{sal}/\mathbf{V}_{ent}$ igual a

$$(a)\ 2(\mathbf{s}+1)^2;\ (b)\ \frac{3}{(\mathbf{s}+500)(\mathbf{s}+100)}.$$


58. Diseñe un circuito que produzca la función de transferencia

$$\mathbf{H}(\mathbf{s}) = \frac{\mathbf{V}_{sal}}{\mathbf{V}_{ent}} = 5\frac{\mathbf{s}+10^4}{\mathbf{s}+2\times 10^5}.$$


59. Diseñe un circuito que produzca la función de transferencia

$$\mathbf{H}(\mathbf{s}) = \frac{\mathbf{V}_{sal}}{\mathbf{V}_{ent}} = 3\frac{\mathbf{s}+50}{(\mathbf{s}+75)^2}.$$

60. Determine $\mathbf{H}(\mathbf{s}) = \mathbf{V}_{sal}/\mathbf{V}_{ent}$ como una razón de polinomios en **s** para el amp op de la figura 15.42 indicando los valores de impedancia (en Ω): (*a*) $\mathbf{Z}_1(\mathbf{s}) = 10^3 + (10^8/\mathbf{s})$, $\mathbf{Z}_f(\mathbf{s}) = 5\,000$; (*b*) $\mathbf{Z}_1(\mathbf{s}) = 5\,000$, $\mathbf{Z}_f(\mathbf{s}) = 10^3 + (10^8/\mathbf{s})$; (*c*) $\mathbf{Z}_1(\mathbf{s}) = 10^3 + (10^8/\mathbf{s})$, $\mathbf{Z}_f(\mathbf{s}) = 10^4 + (10^8/\mathbf{s})$.

Ejercicios de integración del capítulo

 
61. Diseñe un circuito que dé una frecuencia de 16 Hz, la cual está cerca al límite inferior del rango de la audición humana. Verifique su diseño con una simulación adecuada.

 
62. Diseñe un circuito que dé una señal de tono multifrecuencial de (DTMF) correspondiente al número 9, que es una salida de tensión compuesta de una señal de 1 477 Hz y una señal de 852 Hz.

 
63. (*a*) Diseñe un circuito que dé una señal a 261.6 Hz, que es aproximadamente la del do mayor. Use sólo valores de resistencia estándar con tolerancia de 5%. (*b*) Estime la gama probable de frecuencia de su generador de señal, con base en la gama de valores posibles de las resistencias que se pueden usar en su construcción.

 
64. (*a*) Muchas personas con pérdida parcial de la audición, especialmente las de edad avanzada, tienen dificultad para percibir los detectores estándar de humo. Una alternativa es bajar la frecuencia a aproximadamente 500 Hz. Diseñe un circuito que dé una señal así, usando sólo valores de resistencias y capacitores estándar con 10% de tolerancia. (*b*) Estime la gama real de frecuencias que se espera de su diseño si se fabrica con base en la gama posible de valores de los componentes.

 
65. Diseñe un circuito que dé ya sea una señal de 200 Hz o una de 400 Hz cerrando los interruptores adecuados.

- Los cuatro tipos básicos de filtros son: pasabajas, pasaaltas, pasabanda y rechazabanda. (Ejemplos 16.11, 16.12)
- Los filtros pasivos sólo utilizan resistencias, capacitores e inductores; los filtros activos se basan en los amp op o en otros elementos activos. (Ejemplo 16.13)
- Los filtros Butterworth y Chebyshev se pueden diseñar con base en el sencillo amplificador Sallen-Key. La ganancia del filtro usualmente se tiene que ajustar agregando a la salida un circuito amplificador basado puramente en resistencias.

LECTURAS ADICIONALES

El estudio de una gran variedad de filtros puede encontrarse en

J. T. Taylor y Q. Huang, eds., *CRC Handbook of Electrical Filters*. Boca Raton, Fla: CRC Press,1977.

Una compilación muy completa de varios circuitos con filtros activos y procedimientos de diseño se proporciona en

D. Lancaster, *Lancaster's Active Filter Cookbook,* 2a. ed. Burlington, Mass.: Newnes, 1996.

Las referencias adicionales que el lector podría encontrar útiles incluyen:

D. E. Johnson y J. L. Hilburn, *Rapid Practical Design of Active Filters*. Nueva York: John Wiley & Sons, Inc., 1975.

J. V. Wait, L. P. Huelsman, y G. A. Korn, *Introduction to Operational Amplifier Theory and Applications*, 2a. ed. Nueva York: McGraw-Hill, 1992.

EJERCICIOS

16.1 Resonancia en paralelo

1. Calcule Q_0 y ζ para una red *RLC* simple en paralelo si (*a*) $R = 1$ kΩ, $C = 10$ mF y $L = 1$ H; (*b*) $R = 1\ \Omega$, $C = 10$ mF y $L = 1$ H; (*c*) $R = 1$ kΩ, $C = 1$ F y $L = 1$ H; (*d*) $R = 1\ \Omega$, $C = 1$ F y $L = 1$ H.
2. Para el circuito que se muestra en la figura 16.1, suponga $R = 1$ kΩ, $C = 22$ mF y $L = 12$ mH. (*a*) Calcule α, ω_0, ζ, f_0 y ω_d para el circuito. (*b*) Si $\mathbf{I} = 1\underline{/0^\circ}$ A, grafique $\mathbf{V}$, $\mathbf{I}_{LC}$, $\mathbf{I}_L$ e $\mathbf{I}_C$ en función de la frecuencia, y verifique que $\mathbf{I}$ y $\mathbf{V}$ estén en fase a ω_0. (*c*) ¿Cuál es la relación de $\mathbf{I}_L$ a $\mathbf{I}_C$ a ω_0?
3. Cierto circuito *RLC* en paralelo se construye usando valores de componentes $L = 50$ mH y $C = 33$ mH. Si $Q_0 = 10$, determine el valor de R y luego haga una gráfica de la magnitud de la impedancia de estado estable en el rango $2 < \omega < 40$ rad/s.
4. Una red *RLC* en paralelo se construye usando $R = 5\Omega$, $L = 100$ mH y $C = 1$ mH. (*a*) Calcule Q_0. (*b*) Determine a qué frecuencias cae la magnitud de la impedancia a 90% de su valor máximo.
5. Para la red de la figura 16.50, deduzca una expresión para la impedancia de entrada en estado estable y determine la frecuencia a la que tiene amplitud máxima.
6. Grafique la admitancia de entrada de la red representada en la figura 16.50 usando una escala logarítmica de frecuencia dentro del rango $0.01\omega_0 < \omega_0 < 100\ \omega_0$, y determine la frecuencia resonante y el ancho de banda de la red.
7. Quite la resistencia de 2 Ω en la red de la figura 16.50 y determine (*a*) la magnitud de la impedancia de entrada en resonancia; (*b*) la frecuencia resonante; (*c*) Q_0.
8. Quite la resistencia de 1 Ω en la red de la figura 16.50 y determine (*a*) la magnitud de la impedancia de entrada en resonancia; (*b*) la frecuencia resonante; (*c*) Q_0.

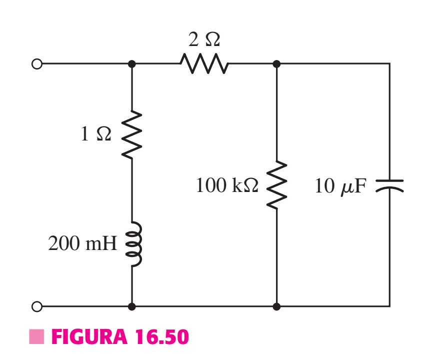


FIGURA 16.50

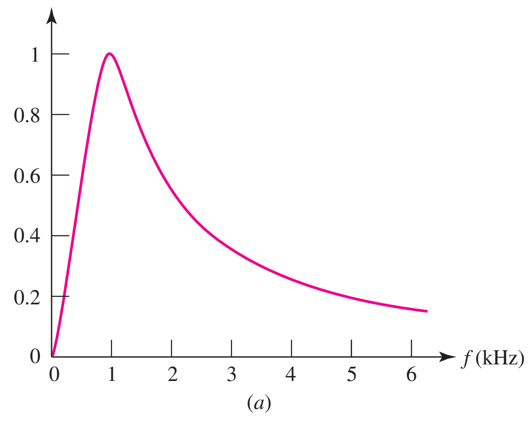
9. Un varactor es un dispositivo semiconductor cuya reactancia se podría variar aplicando una tensión de polarización. Es posible expresar el factor de calidad[3] como:

$$Q \approx \frac{\omega C_J R_P}{1 + \omega^2 C_J^2 R_P R_S}$$

donde $C j$ es la capacitancia de la unión (que depende de la tensión aplicada al dispositivo), R_S es la resistencia en serie del dispositivo y R_P es un término de resistencia en paralelo equivalente. (*a*) Si $C_J = 3.77$ pF a 1.5 V, $R_P = 1.5$ MΩ y $R_S = 2.8$ Ω, grafique el factor de calidad como una función de la pulsación ω. (*b*) Derive la expresión de Q a fin de obtener tanto ω_0 como $Q_{\text{máx}}$.

16.2 Ancho de banda y circuitos con alta *Q*

10. El circuito de la figura 16.1 se construye usando valores de componentes $L = 1$ mH y $C = 100$ μF. Si $Q_0 = 15$, determine el ancho de banda y estime la magnitud y ángulo de la impedancia de entrada para operación en (*a*) 3 162 rad/s; (*b*) 3 000 rad/s; (*c*) 3 200 rad/s; (*d*) 2 000 rad/s. (*e*) Verifique sus estimados usando una expresión exacta para $\mathbf{Y}(j\omega)$.
11. Se construye una red de *RLC* en paralelo con un inductor de 5 mH, y los valores de los demás componentes se eligen de manera que $Q_0 = 6.5$ y $\omega_0 = 1\,000$ rad/s. Determine el valor aproximado de la magnitud de la impedancia de entrada para operación en (*a*) 500 rad/s; (*b*) 750 rad/s; (*c*) 900 rad/s; (*d*) 1 100 rad/s. (*e*) Grafique sus estimados junto con el resultado exacto usando un eje de frecuencia lineal (rad/s).
12. Se construye un circuito *RLC* en paralelo con un inductor de 200 μH, y los valores de los demás componentes se eligen de manera que $Q_0 = 8$ y $\omega_0 = 5\,000$ rad/s. Use expresiones aproximadas para estimar el ángulo de la impedancia de entrada para operación en (*a*) 2 000 rad/s; (*b*) 3 000 rad/s; (*c*) 4 000 rad/s; (*d*) 4 500 rad/s. (*e*) Grafique sus estimados junto con el resultado exacto usando un eje de frecuencia lineal (rad/s).
13. Determine el ancho de banda de cada una de las curvas de respuesta que se muestran en la figura 16.51.



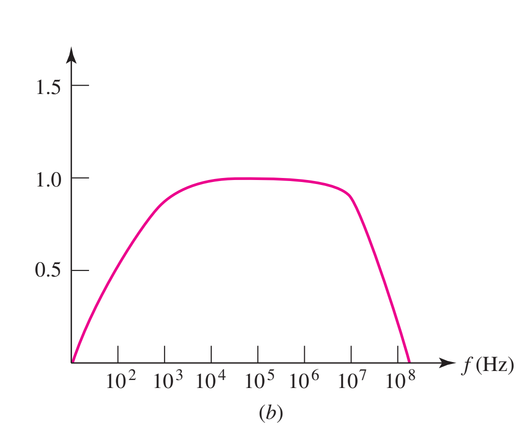
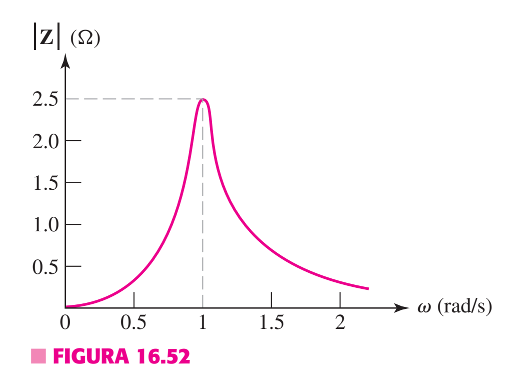


FIGURA 16.51

14. Se construye un circuito *RLC* en paralelo de manera que tenga la característica de magnitud de impedancia de entrada que se grafica en la figura 16.52. (*a*) Determine el valor de la resistencia. (*b*) Determine el valor del capacitor si se usara un inductor de 1 H. (*c*) Obtenga valores para el ancho de banda, Q_0, y la frecuencia de media potencia tanto baja como alta.

[3] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices,* 2a. ed. Nueva York: Wiley, 1981, p. 116.



■ **FIGURA 16.52**

16.3 Resonancia en serie

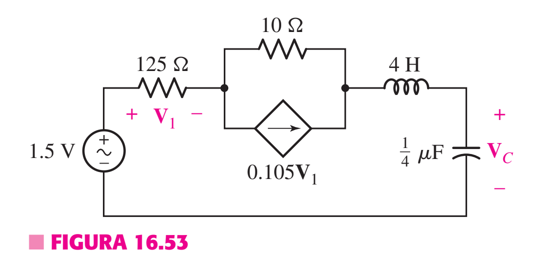
15. Se construye un circuito *RLC* en serie usando valores de componentes $R = 100\ \Omega$ y $L =$ 1.5 mH, junto con una fuente de tensión senoidal v_s. Si $Q_0 = 7$ determine (*a*) la magnitud de la impedancia a 500 Mrad/s; (*b*) la corriente que fluye en respuesta a una tensión $v_s =$ 2.5 cos $(425 \times 10^6 t)$ V.

16. Con referencia al circuito *RLC* en serie que se describe en el ejercicio 15, ajuste el valor de la resistencia de manera que Q_0 se reduzca a 5 y (*a*) estime el ángulo de la impedancia a 90 krad/s, 100 krad/s y 110 krad/s. (*b*) Determine el error porcentual en los valores estimados, en comparación con la expresión exacta.



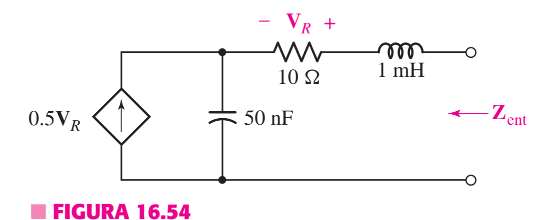
17. Se construye un circuito *RLC* usando $R = 5\ \Omega$, $L = 20$ mH y $C = 1$ mF. Calcule Q_0, el ancho de banda, y la magnitud de la impedancia a 0.95 ω_0 si el circuito está (*a*) conectado en paralelo; (*b*) conectado en serie. (*c*) Verifique sus soluciones mediante simulaciones PSpice adecuadas. (*Pista: Una resistencia grande en paralelo con el capacitor evitará mensajes de error correspondientes a la ausencia de una trayectoria de cd a tierra, y una pequeña resistencia en serie con la fuente de VCA evitará cortocircuito por el inductor durante la determinación del punto de polarización de cd.*)

18. Inspeccione el circuito de la figura 16.53 y observe la amplitud de la tensión de la fuente. Decida si estaría dispuesto a poner sus manos desnudas en los extremos del capacitor, si el circuito se construyera realmente en el laboratorio. Grafique $|\mathbf{V}_C|$ en función de ω para justificar su respuesta.



■ **FIGURA 16.53**

19. Después de obtener $\mathbf{Z}_{\text{ent}}(\mathbf{s})$ en la figura 16.54, determine: (*a*) ω_0; (*b*) Q_0.



■ **FIGURA 16.54**

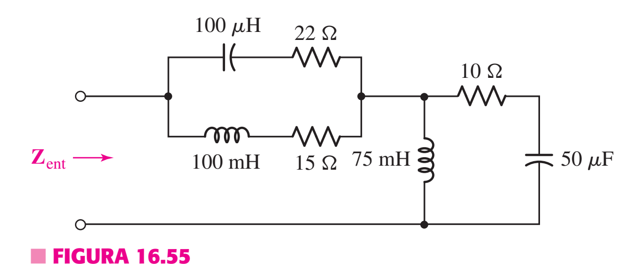
16.4 Otras formas resonantes

20. Para la red de la figura 16.9*a*, $R_1 = 100\ \Omega$, $R_2 = 150\ \Omega$, y $L = 30$ mH y C se elige de manera que $\omega_0 = 750$ rad/s. Calcule la magnitud de la impedancia a (*a*) la frecuencia correspondiente a la resonancia cuando $R_1 = 0$; (*b*) 700 rad/s; (*c*) 800 rad/s.

21. Suponiendo una frecuencia de operación de 200 rad/s, encuentre un equivalente en serie de la combinación en paralelo de una resistencia de 500 Ω y (*a*) un capacitor de 1.5 μF; (*b*) un inductor de 200 mH.

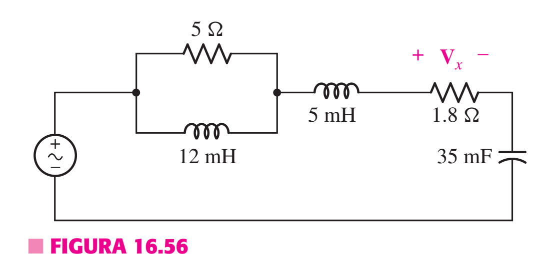
22. Si la frecuencia de operación es de 40 rad/s o de 80 rad/s, encuentre un equivalente en paralelo de la combinación en serie de una resistencia de 2 Ω y (*a*) un capacitor de 100 mF; (*b*) un inductor de 3 mH.

23. Para la red representada en la figura 16.55, determine la frecuencia resonante y el valor correspondiente de $|\mathbf{Z}_{ent}|$.



■ **FIGURA 16.55**

24. Para el circuito de la figura 16.56, la fuente de tensión tiene magnitud de 1 V y ángulo de fase de 0°. Determine la frecuencia resonante ω_0 y el valor de $\mathbf{V}_x$ a $0.95\omega_0$.



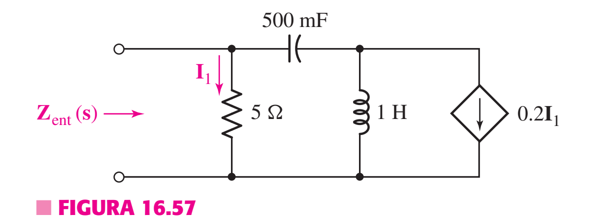
■ **FIGURA 16.56**

16.5 Escalamiento (o ajuste)

25. Se construye un circuito *RLC* en paralelo usando valores de componentes $R = 1\ \Omega$, $C =$ 3F y $L = \frac{1}{3}$ H. Determine los valores necesarios de componentes si la red ha de tener (*a*) una frecuencia resonante de 200 kHz; (*b*) un impedancia pico de 500 kΩ; (*c*) una frecuencia resonante de 750 kHz y una magnitud de impedancia en resonancia de 25 Ω.

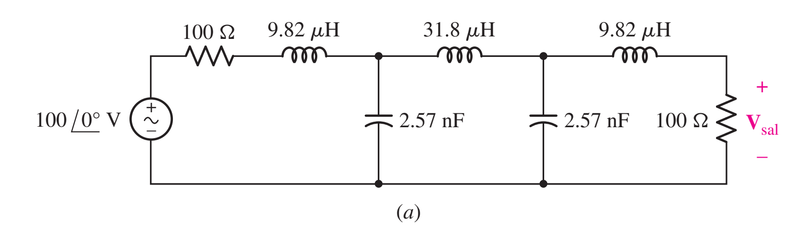
26. Se construye un circuito *RLC* en serie usando valores de componentes $R = 1\ \Omega$, $C = 5$ F y $L = \frac{1}{5}$ Hz. Determine los valores necesarios de componentes si la red ha de tener (*a*) una frecuencia resonante de 430 Hz; (*b*) una impedancia pico de 100 Ω; (*c*) una frecuencia resonante de 75 kHz y una impedancia de magnitud en resonancia de 15 Ω.

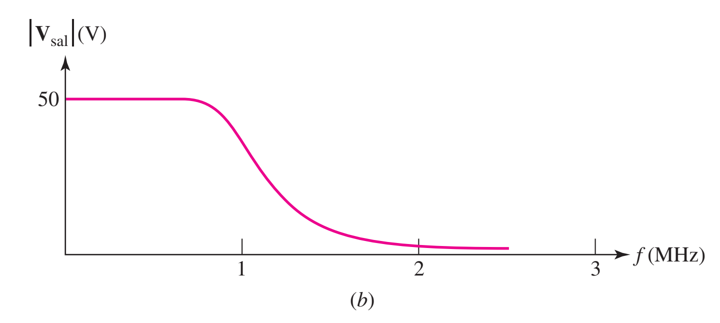
27. Escale la red que se muestra en la figura 16.57 por $K_m = 200$ y $K_f = 700$ y obtenga una expresión para la nueva impedancia $\mathbf{Z}_{ent}(\mathbf{s})$.



■ **FIGURA 16.57**

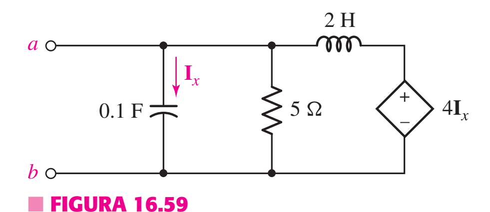
28. El filtro que se muestra en la figura 16.58*a* tiene la curva de respuesta que se indica en la figura 16.58*b*. (*a*) Ajuste el filtro de manera que opere entre una fuente de 50 Ω y una carga de 50 Ω además de tener una frecuencia de corte de 20 kHz. (*b*) Dibuje la nueva curva de respuesta.





■ **FIGURA 16.58**

29. (*a*) Dibuje la nueva configuración de la figura 16.59, después de que la red se ajuste mediante $K_m = 250$ y $K_f = 400$. (*b*) Determine el equivalente de Thévenin de la red ajustada en $\omega = 1$ krad/s.



■ **FIGURA 16.59**

16.6 Diagramas de Bode

30. Dibuje los diagramas de Bode de la magnitud y fase de las siguientes funciones:

$$(a)\ 3 + 4\mathbf{s};\ (b)\ \frac{1}{3 + 4\mathbf{s}}.$$

31. Para las siguientes funciones, dibuje los diagramas de Bode de la magnitud y fase:

$$(a)\ 25\left(1 + \frac{\mathbf{s}}{3}\right)(5 + \mathbf{s});\ \ (b)\ \frac{0.1}{(1 + 5\mathbf{s})(2 + \mathbf{s})}.$$



32. Use el método de Bode para graficar la magnitud de cada una de las siguientes respuestas; en seguida verifique sus soluciones con simulaciones MATLAB adecuadas:

$$(a)\ 3\frac{\mathbf{s}}{\mathbf{s}^2 + 7\mathbf{s} + 10};\ (b)\ \frac{4}{\mathbf{s}^3 + 7\mathbf{s}^2 + 12\mathbf{s}}.$$

33. Si una red dada se describe mediante la función de transferencia $\mathbf{H}(\mathbf{s})$, grafique la magnitud de $\mathbf{H}(\mathbf{s})$ como función de la frecuencia para $\mathbf{H}(\mathbf{s})$ igual a

$$(a)\ \frac{\mathbf{s} + 300}{\mathbf{s}(5\mathbf{s} + 8)};\ (b)\ \frac{\mathbf{s}(\mathbf{s}^2 + 7\mathbf{s} + 7)}{\mathbf{s}(2\mathbf{s} + 4)^2}.$$

34. Grafique la fase de cada una de las siguientes funciones de transferencia:

(*a*) $\frac{\mathbf{s}+1}{\mathbf{s}(\mathbf{s}+2)^2}$; (*b*) $5\frac{\mathbf{s}^2+\mathbf{s}}{\mathbf{s}+2}$.


35. Determine el diagrama de Bode de la magnitud para las siguientes funciones de transferencia y compare con la que se predice usando MATLAB: (*a*) $\mathbf{s}^2 + 0.2\mathbf{s} + 1$;

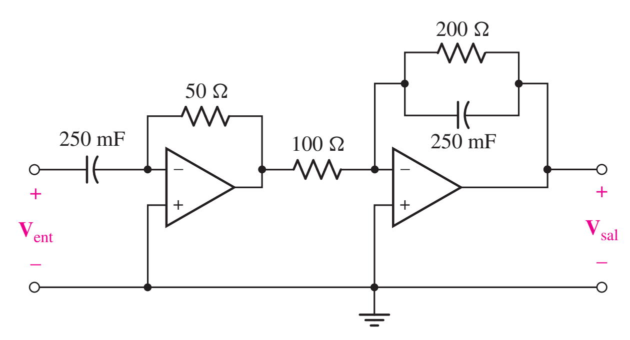
(*b*) $\left(\frac{\mathbf{s}}{4}\right)^2 + 0.1\left(\frac{\mathbf{s}}{4}\right) + 1$.


36. Determine el diagrama de fase correspondiente a cada una de las funciones de transferencia en los ejercicios 33 y 35 y compare sus esquemas con lo que se predice usando MATLAB.

37. Determine el diagrama de Bode de la magnitud para cada una de las siguientes expresiones:

(*a*) $\frac{3+0.1\mathbf{s}+\mathbf{s}^2/3}{\mathbf{s}^2+1}$; (*b*) $2\frac{\mathbf{s}^2+9\mathbf{s}+20}{\mathbf{s}^2(\mathbf{s}+1)^3}$.

38. Para el circuito de la figura 16.60, (*a*) deduzca una expresión para la función de transferencia $\mathbf{H}(\mathbf{s}) = \mathbf{V}_{sal}/\mathbf{V}_{ent}$. (*b*) Trace los diagramas de Bode de la magnitud y fase correspondientes.



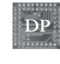
■ **FIGURA 16.60**

39. (*a*) Modifique el circuito que se muestra en la figura 16.60 para agregar un doble polo en 0.05 rad/s y un cero en 0.01 rad/s. (*b*) Trace los diagramas de Bode correspondientes para la magnitud y fase.

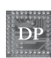
16.7 Diseño de filtros básicos

 
40. (*a*) Diseñe un filtro pasaaltas con una frecuencia de esquina de 100 rad/s. (*b*) Verifique su diseño mediante una simulación PSpice adecuada.

 
41. (*a*) Diseñe un filtro pasabajas con una frecuencia de corte de 1 450 rad/s. (*b*) Trace los diagramas de Bode de magnitud y fase para su diseño. (*c*) Verifique el desempeño del filtro mediante una simulación adecuada.

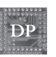
 
42. (*a*) Diseñe un filtro pasabanda caracterizado por un ancho de banda de 1 000 rad/s y una frecuencia de esquina de baja frecuencia de 250 Hz. (*b*) Verifique su diseño con una simulación PSpice adecuada.


43. Diseñe un filtro pasabanda que tenga un corte de baja frecuencia de 500 Hz y un corte de alta frecuencia de 1 580 Hz.


44. Diseñe un filtro rechazabanda que quite “ruido” de 60 Hz de influencias de la línea de transmisión en una señal particular tomando la salida de las terminales de la conexión en serie inductor-capacitor en el circuito de la figura 16.39.


45. Diseñe un filtro pasabajas caracterizado por una ganancia de tensión de 25 dB y una frecuencia de esquina de 5 000 rad/s.


46. Diseñe un filtro pasaaltas caracterizado por una ganancia de tensión de 30 dB y frecuencia de esquina de 50 rad/s.

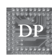
 
47. (*a*) Diseñe el circuito de un filtro de dos etapas con op amp con un ancho de banda de 1 000 rad/s, un corte de baja frecuencia a 100 rad/s y una ganancia de tensión de 20 dB. (*b*) Verifique su diseño mediante una simulación PSpice adecuada.

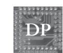

48. Diseñe un circuito que quite todo el rango de audiofrecuencia (aproximadamente 20 Hz a 20 kHz, para la audición humana), pero amplifique la tensión de señal de todas las demás señales por un factor de 15.


49. Dependiendo de qué canción esté usted escuchando, su reproductor MP3 algunas veces reproduce bajos muy débiles, incluso cuando se maximiza el ajuste adecuado. Diseñe un filtro que le permita variar la ganancia en tiempo real de todas las señales de menos de 500 Hz antes de que lleguen a sus auriculares. Incluya un diagrama de todo el sistema.

16.8 Diseño avanzado de filtros


50. Demuestre que el circuito representado por la ecuación [36] no se puede implementar como filtro pasabajas Butterworth ni Chebyshev.


51. Diseñe un filtro pasabajas de segundo orden que tenga una ganancia de tensión de 5 dB y una frecuencia de corte de 1 700 kHz, con base en (*a*) polinomios Butterworth; (*b*) polinomios Chebyshev para factor de rizo de 3 dB.


52. Si se necesita un filtro pasaaltas que tenga una ganancia de 6 dB y una frecuencia de corte de 350 Hz, diseñe una solución adecuada de segundo orden basada en Butterworth.



53. (*a*) Diseñe un filtro Butterworth pasabajasde segundo orden con una frecuencia de corte de 890 rad/s y una ganancia de tensión de 8 dB. (*b*) Verifique su diseño mediante una simulación PSpice adecuada.



54. (*a*) Diseñe un filtro Butterworth pasaaltas de segundo orden con una frecuencia de corte de 2 000 Hz y una ganancia de tensión de 4.5 dB. (*b*) Verifique su diseño mediante una simulación PSpice adecuada.


55. Se necesita un filtro Butterworth pasabajas de tercer orden que tenga una frecuencia de corte de 1 200 Hz y una ganancia de tensión por lo menos de 3 dB. Diseñe un circuito adecuado.




56. (*a*) Diseñe un filtro Butterworth pasabajas de tercer orden que tenga una ganancia de 13 dB y una frecuencia de esquina a 1 800 Hz. (*b*) Compare la respuesta de su filtro con la de un filtro Chebyshev con las mismas especificaciones.


57. Diseñe un filtro Butterworth pasaaltas de cuarto orden que tenga una ganancia mínima de 15 dB y una frecuencia de esquina de 1 100 rad/s.

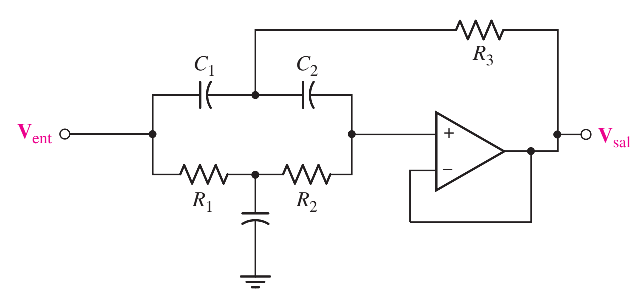


58. Elija parámetros para el circuito descrito por la ecuación [36] de manera que tenga una frecuencia de corte a 450 rad/s y compare su desempeño con un filtro Butterworth comparable de segundo orden.

Ejercicios de integración del capítulo


59. Diseñe un circuito resonante en paralelo para una radio de AM de modo que un inductor variable pueda ajustar la frecuencia resonante dentro de la banda de transmisión de AM 535 a 1 605 kHz, con $Q_0 = 45$ en un extremo de la banda y $Q_0 \leq 45$ en toda la banda. Suponga $R = 20$ kΩ, y especifique valores para C, $L_{mín}$ y $L_{máx}$.

60. Deduzca una expresión para la función de transferencia $\mathbf{V}_{sal}/\mathbf{V}_{ent}$ que describa el circuito que se muestra en la figura 16.61, y grafique su magnitud como función de la frecuencia.



■ FIGURA 16.61


61. La red de la figura 16.36 se implementó como un filtro pasabajas diseñado con una frecuencia de esquina de 1 250 rad/s. Su desempeño es inadecuado en dos aspectos: (1) se

requiere una ganancia de tensión por lo menos de 2 dB, y (2) la magnitud de la tensión de salida no disminuye con suficiente rapidez en la banda de bloqueo.

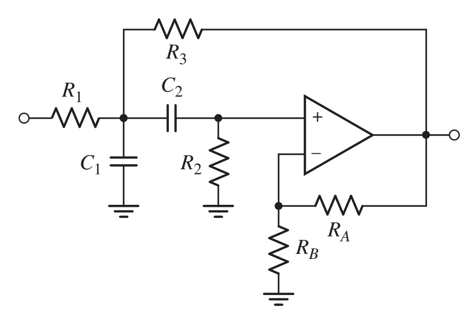
Diseñe una mejor alternativa si sólo hay disponible un amp op y sólo se pueden ubicar dos capacitores de 1 μF.

62. Determine el efecto de la tolerancia de los componentes en el circuito diseñado en el ejemplo 16.14 si para cada componente se especifica que esté sólo dentro de 10% de su valor nominal.

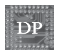
63. Deduzca una expresión para la función de transferencia $\mathbf{V}_{sal}/\mathbf{V}_{ent}$ que describa el circuito que se muestra en la figura 16.62 y haga una gráfica de su magnitud como función de la frecuencia.



64. Para el circuito que se muestra en la figura 16.62, seleccione valores de los componentes de un diseño para frecuencias de esquina de 500 rad/s y 1 500 rad/s. Verifique su diseño.



■ **FIGURA 16.62**



65. Diseñe un filtro pasabanda que cubra la porción del espectro de audio de 200 Hz a 2 kHz y tenga una ganancia mínima de 5 dB y una característica de magnitud más pronunciada en el lado de alta frecuencia que en el lado de baja frecuencia. Verifique su diseño usando una simulación adecuada.

EJERCICIOS

17.1 Redes de un puerto

1. Considere el siguiente sistema de ecuaciones:

$$-2\mathbf{I}_1 + 4\mathbf{I}_2 = 3$$
$$5\mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2 - 9\mathbf{I}_3 = 0$$
$$2\mathbf{I}_1 - 5\mathbf{I}_2 + 4\mathbf{I}_3 = -1$$

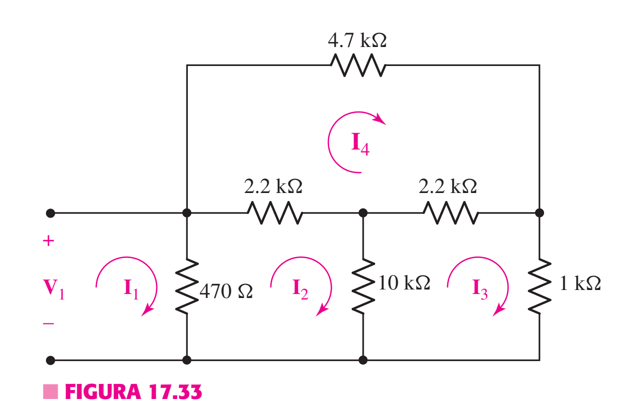
(*a*) Escriba el conjunto de ecuaciones en forma de matriz. (*b*) Determine $\Delta_\mathbf{Z}$ y Δ_{11}. (*c*) Calcule **I**.

2. Para el siguiente sistema de ecuaciones:

$$100\mathbf{V}_1 - 45\mathbf{V}_2 + 30\mathbf{V}_3 = 0.2$$
$$75\mathbf{V}_1 + 80\mathbf{V}_3 = -0.1$$
$$48\mathbf{V}_1 + 200\mathbf{V}_2 + 42\mathbf{V}_3 = 0.5$$

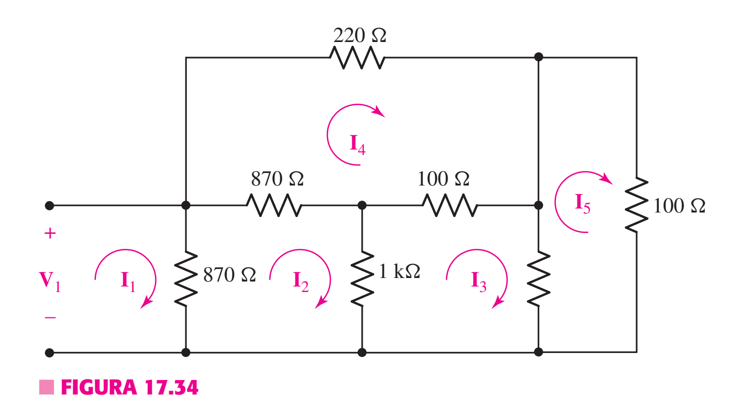
(*a*) Escriba el conjunto de ecuaciones en forma de matriz. (*b*) Use $\Delta_\mathbf{Y}$ solamente para calcular $\mathbf{V}_2$.

3. Respecto a la red pasiva representada en la figura 17.33, (*a*) obtenga las cuatro ecuaciones de malla; (*b*) calcule $\Delta_\mathbf{Z}$ y (*c*) calcule la impedancia de entrada.



■ **FIGURA 17.33**

4. Determine la impedancia de entrada de la red que se muestra en la figura 17.34, después de calcular primero $\Delta_\mathbf{Z}$.



■ **FIGURA 17.34**

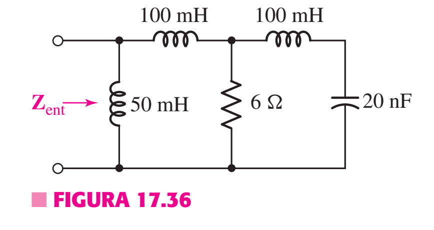
3 S 10 S 2 S + $\mathbf{V}_1$ – 20 S 5 S

■ **FIGURA 17.35**

5. Para la red de un puerto que se representa esquemáticamente en la figura 17.35, elija el nodo inferior como referencia; llame $\mathbf{V}_2$ al nodo entre las conductancias de 3, 10 y 20 S, y llame $\mathbf{V}_3$ al nodo restante. (*a*) Escriba las tres ecuaciones nodales. (*b*) Calcule $\Delta_\mathbf{Y}$. (*c*) Calcule la admitancia de entrada.

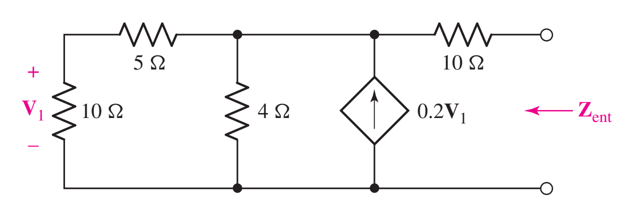
6. Calcule $\Delta_\mathbf{Z}$ y $\mathbf{Z}_{\text{ent}}$ para la red de la figura 17.36 si ω es igual a (*a*) 1 rad/s; (*b*) 320 krad/s.

7. Sea $\omega = 100\pi$ rad/s en la red de un puerto de la figura 17.36. (*a*) Calcule $\Delta_{\mathbf{Y}}$ y la admitancia de entrada en ω, $\mathbf{Y}_{\text{ent}}(\omega)$. (*b*) Se conecta a la red una fuente de corriente sinusoidal de magnitud 100 A, frecuencia de 100π rad/s y fase de 0°. Calcule la tensión entre las terminales de la fuente de corriente (exprese la respuesta como fasor).

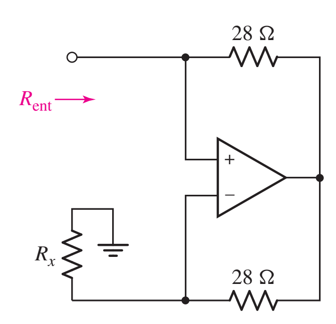


■ **FIGURA 17.36**

8. Con referencia a la red de un puerto de la figura 17.37, que contiene una fuente de corriente dependiente controlada por la tensión sobre una resistencia, (*a*) calcule $\Delta_{\mathbf{Z}}$; (*b*) calcule $\mathbf{Z}_{\text{ent}}$.



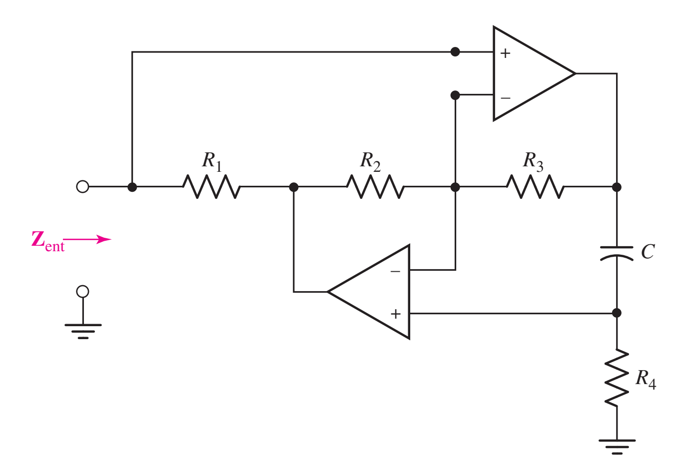
■ **FIGURA 17.37**



■ **FIGURA 17.38**

9. Para el circuito amp op ideal representado en la figura 17.38, la resistencia de entrada es la vista desde la terminal no inversora del amp op y tierra. (*a*) Escriba las ecuaciones nodales adecuadas para la red de un puerto. (*b*) Obtenga una expresión para R_{ent}. ¿Su respuesta es un poco inesperada? Explique.

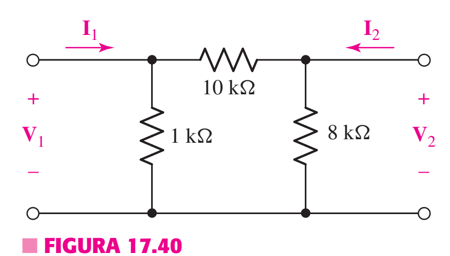
10. (*a*) Si se supone que los amp op del circuito de la figura 17.39 son ideales ($R_i = \infty$, $R_o = 0$ y $A = \infty$), encuentre $\mathbf{Z}_{\text{ent}}$. (*b*) $R_1 = 4$ kΩ, $R_2 = 10$ kΩ, $R_3 = 10$ kΩ, $R_4 = 1$ kΩ y $C = 200$ pF, demuestre que $\mathbf{Z}_{\text{ent}} = j\omega L_{\text{ent}}$, donde $L_{\text{ent}} = 0.8$mH.



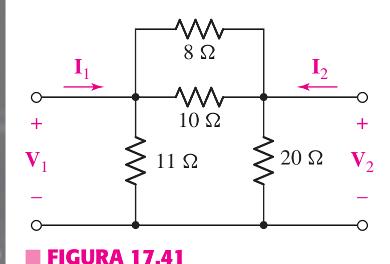
■ **FIGURA 17.39**

17.2 Parámetros de admitancia

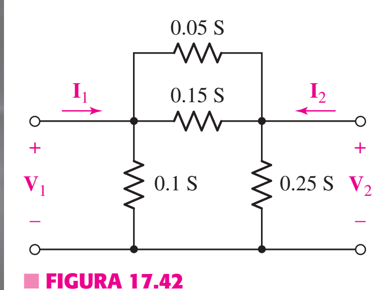
11. Obtenga un conjunto completo de parámetros **y** que describan la red de dos puertos que se muestra en la figura 17.40.



■ **FIGURA 17.40**

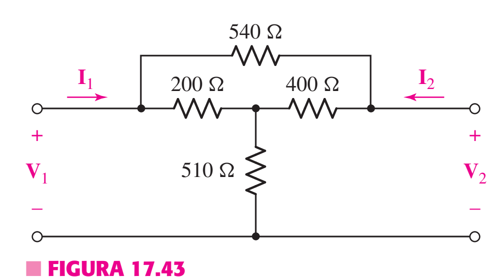


■ **FIGURA 17.41**



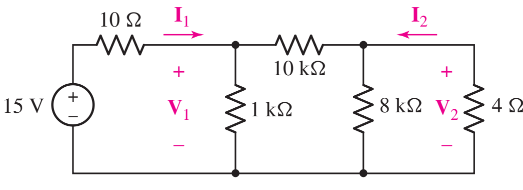
■ **FIGURA 17.42**

12. (*a*) Determine los parámetros de admitancia en cortocircuito que describan por completo la red de dos puertos de la figura 17.41. (*b*) Si $\mathbf{V}_1 = 3$ V y $\mathbf{V}_2 = -2$ V, use su respuesta del inciso (*a*) para calcular $\mathbf{I}_1$ e $\mathbf{I}_2$.
13. (*a*) Determine los parámetros **y** para la red de dos puertos de la figura 17.42. (*b*) Defina el nodo inferior de la figura 17.42 como nodo de referencia, y aplique análisis nodal para obtener expresiones para $\mathbf{I}_1$ e $\mathbf{I}_2$ en términos de $\mathbf{V}_1$ y $\mathbf{V}_2$. Use estas expresiones para escribir la matriz de admitancia. (*c*) Si $\mathbf{V}_1 = 2\mathbf{V}_2 = 10$ V, calcule la potencia disipada en la conductancia de 100 mS.
14. Obtenga un conjunto completo de parámetros **y** para describir la red de dos puertos representada en la figura 17.43.



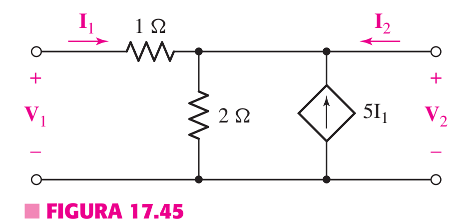
■ **FIGURA 17.43**

15. El circuito de la figura 17.44 es simplemente la red de dos puertos de la figura 17.40, terminada en una red pasiva de un puerto y una red separada de un puerto que consiste en una fuente de tensión en serie con una resistencia. (*a*) Determine el conjunto completo de parámetros de admitancia que describa la red de dos puertos. (*Pista:* Dibuje la red de dos puertos sola, adecuadamente marcada con la tensión y la corriente en cada puerto.) (*b*) Calcule la potencia disipada en la red pasiva de un puerto, usando su respuesta del inciso (*a*).



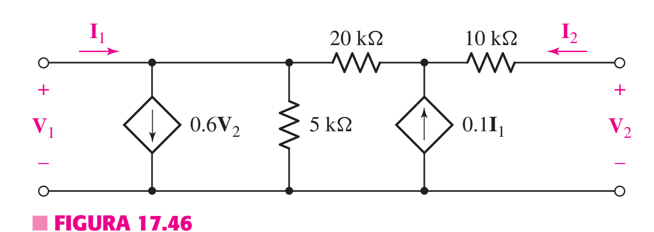
■ **FIGURA 17.44**

16. Reemplace la resistencia de 10 Ω de la figura 17.44 por una resistencia de 1 kΩ, la fuente de 15 V por una de 9 V y la resistencia de 4 Ω por uno de 4 kΩ. (*a*) Determine el conjunto completo de parámetros de admitancia que describe la red de dos puertos que consiste en las resistencias de 1 kΩ, 10 kΩ y 8 kΩ. (*Pista:* Dibuje la red de dos puertos sola, adecuadamente marcada con la tensión y la corriente en cada puerto.) (*b*) Calcule la potencia disipada en la red pasiva de un puerto, usando la respuesta del inciso (*a*).
17. Determine los parámetros de admitancia que describen la red de dos puertos que se muestra en la figura 17.45



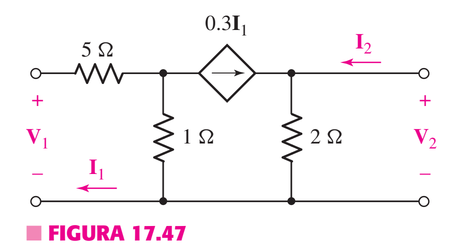
■ **FIGURA 17.45**

18. Obtenga el parámetro **y** para la red que se muestra en la figura 17.46 y úselo para determinar $\mathbf{I}_1$ e $\mathbf{I}_2$ si (*a*) $\mathbf{V}_1 = 0$, $\mathbf{V}_2 = 1$ V; (*b*) $\mathbf{V}_1 = -8$ V, $\mathbf{V}_2 = 3$ V; (*c*) $\mathbf{V}_1 = \mathbf{V}_2 = 5$ V.



■ **FIGURA 17.46**

19. Use un método adecuado para obtener **y** para la red de la figura 17.47.



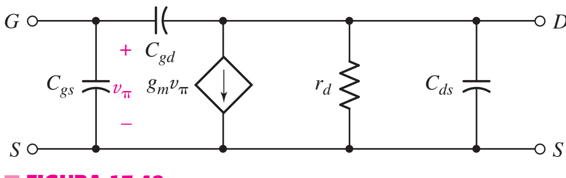
■ **FIGURA 17.47**

20. A menudo, el transistor semiconductor de metal-óxido de efecto de campo (MOSFET), un elemento no lineal de tres terminales que se utiliza en muchas aplicaciones de la electrónica, se especifica en términos de sus parámetros **y**. Los parámetros en ca dependen en gran medida de las condiciones de medición y comúnmente se llaman y_{is}, y_{rs}, y_{fs} y y_{os}, como en:

$$I_g = y_{is}V_{gs} + y_{rs}V_{ds} \qquad [49]$$

$$I_d = y_{fs}V_{gs} + y_{os}V_{ds} \qquad [50]$$

donde I_g es la corriente de compuerta del transistor, I_d es la corriente de drenado del transistor y la tercera terminal (la fuente) es común a la entrada y a la salida durante la medición. Por lo tanto, V_{gs} es la tensión entre la compuerta y la fuente y V_{ds} es la tensión entre el drenado y la fuente. El modelo típico a alta frecuencia que se utiliza para aproximar el comportamiento de un MOSFET se muestra en la figura 17.48.

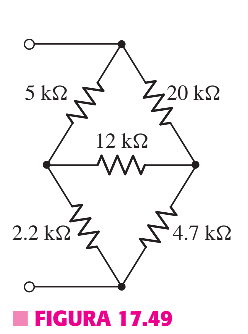


■ **FIGURA 17.48**

(*a*) En el caso de la configuración que se acaba de especificar, ¿qué terminal del transistor se utilizó como la entrada, y qué terminal se utilizó como salida? (*b*) Deduzca las expresiones de los parámetros y_{is}, y_{rs}, y_{fs} y y_{os}, definidos en las ecuaciones [49] y [50], en términos de los parámetros del modelo C_{gs}, C_{gd}, g_m, r_d y C_{ds}, de la figura 17.48. (*c*) Calcule y_{is}, y_{rs}, y_{fs} y y_{os}, y $g_m = 4.7$ mS, $C_{gs} = 3.4$ pF, $C_{gd} = 1.4$ pF, $C_{ds} = 0.4$ pF y $r_d = 10$ kΩ.

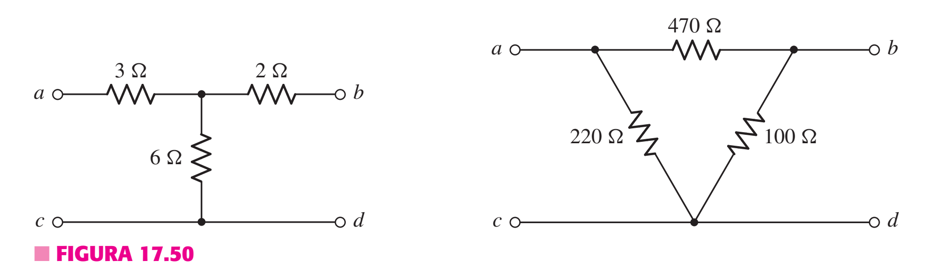
17.3 Algunas redes equivalentes

21. Para la red de dos puertos que se muestra en la figura 17.49, (*a*) determine la resistencia de entrada; (*b*) calcule la potencia disipada por la red si se conecta en paralelo con una fuente de corriente de 2A; (*c*) calcule la potencia disipada por la red si se conecta en paralelo con una fuente de tensión de 9 V.



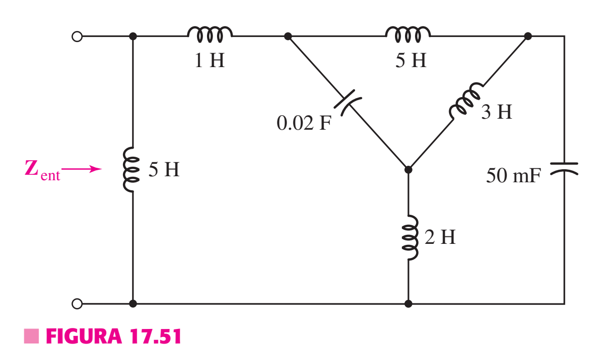
■ **FIGURA 17.49**

22. Con referencia a las dos redes de la figura 17.50, convierta la red conectada en Δ en una red conectada en Y, y viceversa.



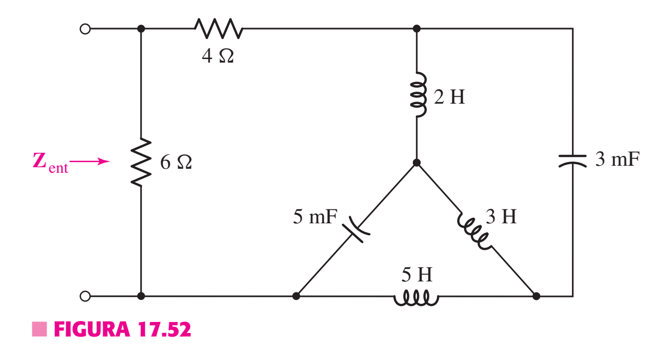
■ **FIGURA 17.50**

23. Determine la impedancia de entrada $\mathbf{Z}_{ent}$ de la red de un puerto que se muestra en la figura 17.51 si ω es igual a (*a*) 50 rad/s; (*b*) 1 000 rad/s.



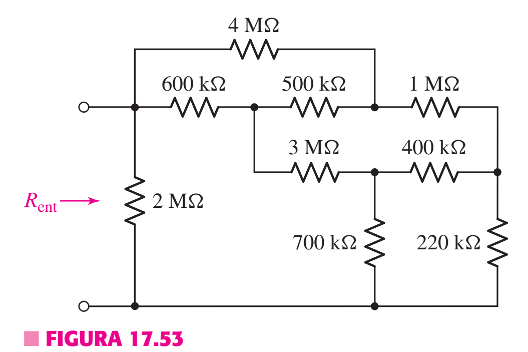
■ **FIGURA 17.51**

24. Determine la impedancia de entrada $\mathbf{Z}_{ent}$ de la red de un puerto que se muestra en la figura 17.52 si ω es igual a (*a*) 50 rad/s; (*b*) 1 000 rad/s.



■ **FIGURA 17.52**

25. Use técnicas de conversión Δ-Y según convenga para determinar la resistencia de entrada R_{ent} de la red de un puerto que se muestra en la figura 17.53.



■ **FIGURA 17.53**

26. Use técnicas adecuadas para encontrar un valor para la resistencia de entrada de la red de un puerto que se muestra en el esquema de la figura 17.54.

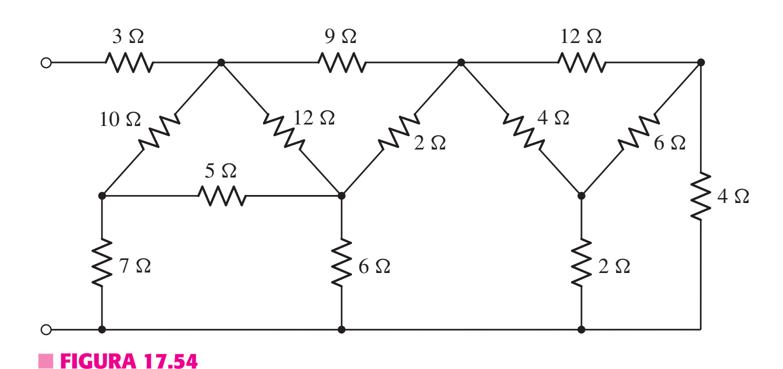


FIGURA 17.54

27. (*a*) Determine los valores de los parámetros que se necesitan para modelar la red de la figura 17.43 con la red alternativa que se muestra en la figura 17.13*a*. (*b*) verifique que las dos redes sean en efecto equivalentes, calculando la potencia disipada en la resistencia de 2 Ω conectado a la derecha de cada red y conectando una fuente de corriente de 1 A a las terminales de la izquierda.

28. (*a*) La red de la figura 17.13*b* es equivalente a la red de la figura 17.43 suponiendo que se eligen los valores de parámetros adecuados. (*a*) Calcule los valores de parámetros necesarios. (*b*) Verifique la equivalencia de las dos redes terminando cada una con una resistencia de 1 Ω (entre sus terminales $\mathbf{V}_2$), conectando una fuente de 10 mA a las otras terminales y demostrando que $\mathbf{I}_1$, $\mathbf{V}_1$, $\mathbf{I}_2$ y $\mathbf{V}_2$ son iguales para ambas redes.


29. Calcule los tres valores de parámetros necesarios para construir una red equivalente para la figura 17.43 modelada según la red de la figura 17.13*c*. Verifique su equivalencia mediante una simulación PSpice adecuada. (*Pista:* Conecte algún tipo de fuente(s) o carga(s).)


30. Es posible construir una red de dos puertos que sea una alternativa a la que se muestra en la figura 17.47, seleccionando los valores de parámetros adecuados como se marcan en el diagrama de la figura 17.13. (*a*) Construya dicha red equivalente. (*b*) Verifique su equivalencia mediante una simulación PSpice adecuada. (*Pista:* Conecte algún tipo de fuente(s) y carga(s).)

31. Sea $\mathbf{y} = \begin{bmatrix} 0.1 & -0.05 \\ -0.5 & 0.2 \end{bmatrix}$(S) del dos puertos de la figura 17.55. Determine (*a*) $\mathbf{G}_V$; (*b*) $\mathbf{G}_I$; (*c*) G_P; (*d*) $\mathbf{Z}_{\text{ent}}$; (*e*) $\mathbf{Z}_{\text{sal}}$. (*f*) Si la ganancia de tensión inversa $\mathbf{G}_{V,\,rev}$ se define como $\mathbf{V}_1/\mathbf{V}_2$ con $\mathbf{V}_s = 0$ y se elimina R_L calcule $\mathbf{G}_{V,\,rev}$. (*g*) Si la ganancia de potencia de inserción G_{ms} se define como el cociente de $P_{5\Omega}$ con el dos puertos en su sitio y $P_{5\Omega}$ con el dos puentes sustituidos por puentes que conectan cada terminal de entrada con la terminal de salida correspondiente, calcule G_{ms}.

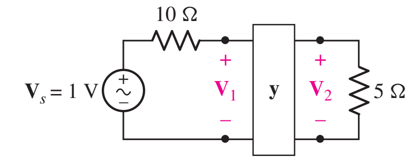


FIGURA 17.55

17.4 Parámetros de impedancia

32. Convierta los siguientes parámetros **z** a parámetros **y**, o viceversa, como sea apropiado:

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} 2 & 3 \\ 5 & 1 \end{bmatrix} \Omega \qquad \mathbf{z} = \begin{bmatrix} 1000 & 470 \\ 2500 & 900 \end{bmatrix} \Omega$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} 0.001 & 0.005 \\ 0.006 & 0.03 \end{bmatrix} \text{S} \qquad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ -1 & 3 \end{bmatrix} \text{S}$$

33. Mediante el empleo de las ecuaciones [32] a [35] obtenga un conjunto completo de parámetros **z** para la red dada en la figura 17.56.

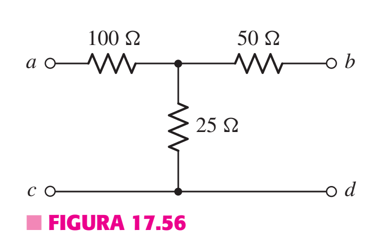


FIGURA 17.56

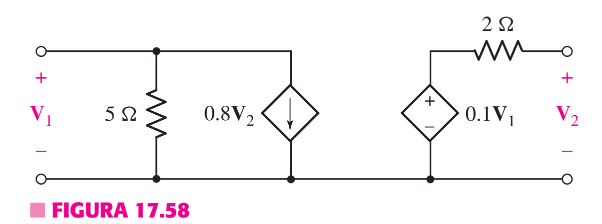
34. La red de la figura 17.56 se termina con una resistencia de 10 Ω entre las terminales *b* y *d* y se conecta una fuente de corriente sinusoidal de 6 mA que opera a 100 Hz en paralelo con una resistencia de 50 Ω entre las terminales *a* y *c*. Calcule las ganancias de tensión, corriente y potencia, respectivamente, así como la impedancia de entrada y salida.

35. Las redes de dos puertos de la figura 17.50 se conectan en serie. (*a*) Determine los parámetros de impedancia para la conexión en serie encontrando primero los parámetros **z** de las redes individuales. (*b*) Si, en vez de esto, las dos redes se conectan en paralelo, determine los parámetros de admitancia de la combinación encontrando primero los parámetros **y** de las redes individuales. (*c*) Verifique su respuesta del inciso (*b*) usando la tabla 17.1 en combinación con su respuesta del inciso (*a*).

36. (*a*) Use un método adecuado para obtener los parámetros de impedancia que describen la red que se ilustra en la figura 17.57. (*b*) Si se conecta una fuente de 1 V en serie con una resistencia de 1 kΩ al puerto de la izquierda de manera que la terminal de referencia negativa de la fuente se conecte a la terminal común de la red, y se conecta una carga de 5 kΩ entre las terminales de la derecha, calcule la tensión de corriente y la ganancia de potencia.

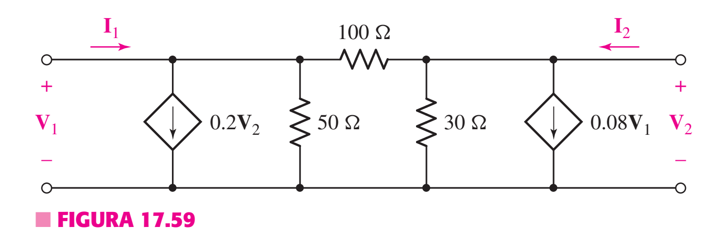
■ FIGURA 17.57

37. Determine los parámetros de impedancia para la red de dos puertos que se muestra en la figura 17.58.



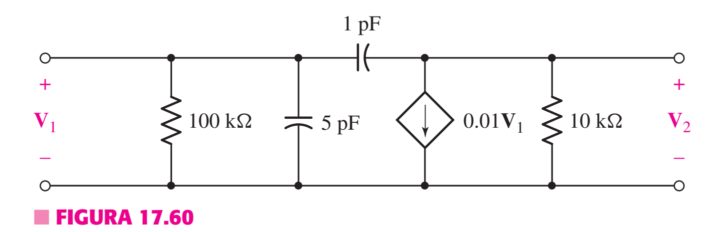
■ FIGURA 17.58

38. Obtenga tanto los parámetros de impedancia como los de admitancia para la red de dos puertos de la figura 17.59.



■ FIGURA 17.59

39. Determine los cuatro parámetros **z** a $\omega = 10^8$ rad/s para el circuito equivalente del transistor de alta frecuencia de la figura 17.60.

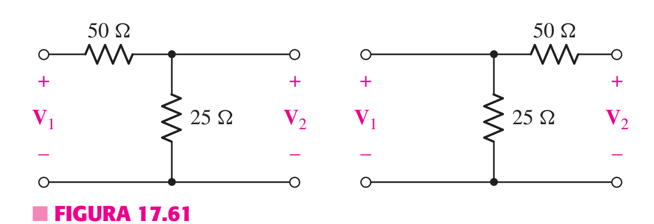


■ FIGURA 17.60

17.5 Parámetros híbridos

40. Determine los parámetros **h** que describen la red puramente resistiva de la figura 17.56, conectando adecuadamente 1 V, 1 A y cortocircuitos a las terminales, según se requiera.

41. Obtenga los parámetros **h** de las redes de dos puertos de la figura 17.61.



■ **FIGURA 17.61**

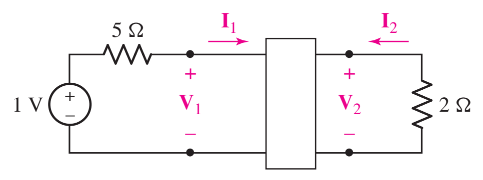
42. Si para una red de dos puertos particular, **h** está dada por $\mathbf{h} = \begin{bmatrix} 2\ \text{k}\Omega & -3 \\ 5 & 0.01\ \text{S} \end{bmatrix}$, calcule (*a*) **z** y (*b*) **y**.

43. Cierta red de dos puertos está descrita por los parámetros híbridos $\mathbf{h} = \begin{bmatrix} 100\ \Omega & -2 \\ 5 & 0.1\ \text{S} \end{bmatrix}$.

    Determine los nuevos parámetros **h** si se conecta una resistencia de 25 Ω en paralelo con (*a*) la entrada; (*b*) la salida.

44. Un transistor de unión bipolar de capas está conectado en configuración de emisor común y se encuentra que tiene parámetros **h**: $h_{11} = 5$ kΩ, $h_{12} = 0.55 \times 10^{-4}$, $h_{21} = 300$ y $h_{22} = 39\ \mu$S. (*a*) Escriba **h** en forma de matriz. (*b*) Determine la ganancia de corriente de señal pequeña. (*c*) Determine la resistencia de salida en kΩ. (*d*) Si se conecta a las terminales de entrada una fuente de tensión senoidal con frecuencia de 100 rad/s y amplitud de 5 mV, en serie con una resistencia de 100 Ω, calcule la tensión pico que aparece entre las terminales de salida.

45. La red de dos puertos que desempeña un papel principal en el circuito de la figura 17.62 se puede caracterizar por los parámetros híbridos $\mathbf{h} = \begin{bmatrix} 1\ \Omega & -1 \\ 2 & 0.5\ \text{S} \end{bmatrix}$. Determine $\mathbf{I}_1$, $\mathbf{I}_2$, $\mathbf{V}_1$ y $\mathbf{V}_2$.

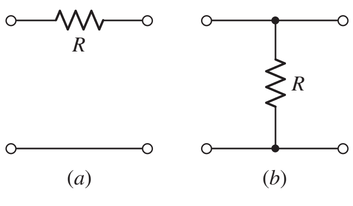


■ **FIGURA 17.62**

46. Las dos redes de la figura 17.61 se conectan en serie mediante la conexión de sus terminales como se ilustra en la figura 17.22 (suponga que la red izquierda de la figura 17.61 es la red *A*). Determine el nuevo conjunto de parámetros **h** que describen la conexión en serie.

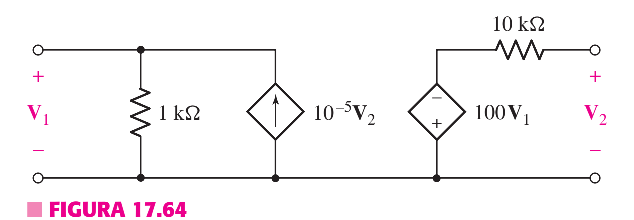
47. Las dos redes de la figura 17.61 se conectan en paralelo mediante la conexión de las terminales de entrada correspondientes, seguida de la conexión de las terminales de salida correspondientes. Determine el nuevo conjunto de parámetros **h** que describen la conexión en paralelo.

48. Determine **y**, **z** y **h** para ambos dos puertos de la figura 17.63. Si algún parámetro resulta infinito, páselo por alto (no lo tome en cuenta).



■ **FIGURA 17.63**

49. (*a*) Determine **h** para el dos puertos de la figura 17.64. (*b*) Calcule $\mathbf{Z}_{sal}$ si la entrada contiene $\mathbf{V}_s$ en serie con $R_s = 200\ \Omega$.



■ **FIGURA 17.64**

17.6 Parámetros de transmisión

50. (*a*) Con la ayuda de las ecuaciones de malla adecuadas, determine la matriz *ABCD* que representa la red de dos puertos que se muestra en la figura 17.9. (*b*) Convierta su respuesta a **h**.
51. (*a*) Use ecuaciones de malla adecuadas para obtener los parámetros **t** que caracterizan la red de la figura 17.57. (*b*) Si se define que las corrientes $\mathbf{I}_1$ e $\mathbf{I}_2$ fluyen hacia las terminales de referencia (+) de $\mathbf{V}_1$ y $\mathbf{V}_2$, respectivamente, calcule las tensiones si $\mathbf{I}_1 = 2\mathbf{I}_2 = 3$ mA.
52. Considere las siguientes matrices:

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} 5 & 2 \\ 4 & 1 \end{bmatrix} \qquad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 1.5 & 1 \\ 1 & 0.5 \end{bmatrix} \qquad \mathbf{c} = \begin{bmatrix} -4 \\ 2 \end{bmatrix}$$

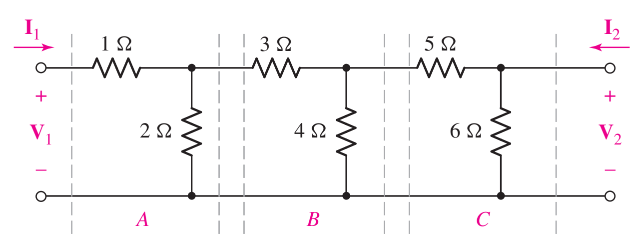
Calcule (*a*) $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$; (*b*) $\mathbf{b} \cdot \mathbf{a}$; (*c*) $\mathbf{a} \cdot \mathbf{c}$; (*d*) $\mathbf{b} \cdot \mathbf{c}$; (*e*) $\mathbf{b} \cdot \mathbf{a} \cdot \mathbf{c}$; (*f*) $\mathbf{a} \cdot \mathbf{a}$.

53. Dos redes están representadas por las siguientes matrices de impedancia:

$$\mathbf{z}_1 = \begin{bmatrix} 4.7 & 0.5 \\ 0.87 & 1.8 \end{bmatrix} \text{k}\Omega \text{ y } \mathbf{z}_2 = \begin{bmatrix} 1.1 & 2.2 \\ 0.89 & 1.8 \end{bmatrix} \text{k}\Omega\text{, respectivamente.}$$

(*a*) Determine la matriz **t** que caracteriza la red en cascada que resulta al conectar la red 2 a la salida de la red 1. (*b*) Invierta el orden de las redes y calcule la nueva matriz **t** que resulta.

54. La red de dos puertos de la figura 17.65 se puede visualizar como tres redes individuales de dos puertos en cascada, *A, B y C*. (*a*) Calcule **t** para cada red. (*b*) Obtenga **t** para la red en cascada. (*c*) Verifique su respuesta llamando V_x y V_y a los dos nodos medios, respectivamente, escribiendo las ecuaciones nodales, obteniendo los parámetros de admitancia a partir de sus ecuaciones nodales y convirtiendo a parámetros **t** mediante la tabla 17.1.

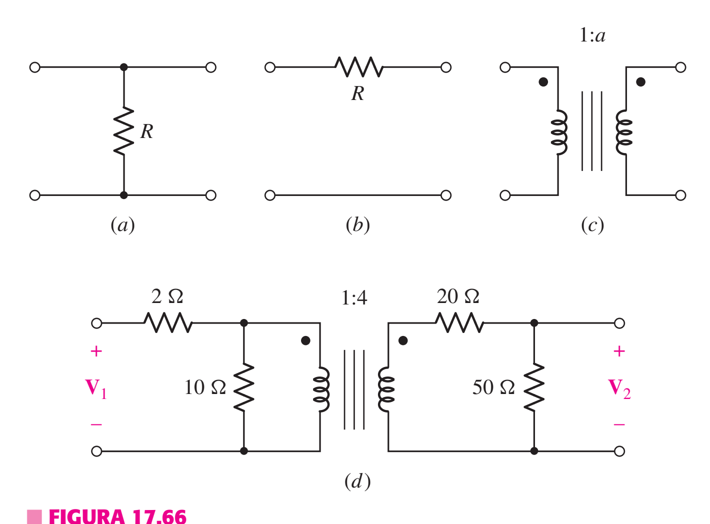


■ **FIGURA 17.65**

55. Considere las dos redes individuales de dos puertos de la figura 17.61. Determine la matriz *ABCD* que caracteriza la red en cascada que resulta al conectar (*a*) la salida de la red izquierda a la entrada de la red derecha; (*b*) la salida de la red derecha a la entrada de la red izquierda.
56. (*a*) Determine los parámetros **t** que describen la red de dos puertos de la figura 17.58. (*b*) Calcule $\mathbf{Z}_{sal}$ si se conecta una fuente de tensión práctica que tenga una resistencia de 100 Ω en serie a las terminales de entrada de la red.

57. Se ponen en cascada tres redes idénticas a la representada en la figura 17.56. Determine los parámetros **t** que representen totalmente el resultado.

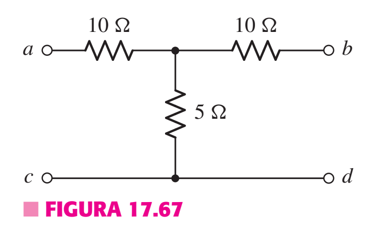
58. (*a*) Determine $\mathbf{t}_a$, $\mathbf{t}_b$ y $\mathbf{t}_c$ de las redes que se muestran en la figura 17.66*a*, *b* y *c*. (*b*) Mediante las reglas de la interconexión del dos puertos con otro en cascada, calcule **t** de la red de la figura 17.66*d*.



■ **FIGURA 17.66**

Ejercicios de integración del capítulo

59. (*a*) Obtenga los parámetros **y**, **z**, **h** y **t** para la red que se muestra en la figura 17.67, usando ya sea las ecuaciones definitorias o las ecuaciones de malla/nodales. (*b*) Verifique sus respuestas usando las relaciones de la tabla 17.1



■ **FIGURA 17.67**

60. Cuatro redes, cada una idéntica a la representada en la figura 17.67, se conectan en paralelo de manera que todas las terminales marcadas *a* se unen, todas las terminales designadas *b* se unen y todas las terminales marcadas *c* y *d* se conectan. Obtenga los parámetros **y**, **z**, **h** y **t** que describan la red conectada en paralelo.

61. Una red en cascada de 12 elementos se forma usando cuatro redes de dos puertos idénticas a la que se muestra en la figura 17.67. Determine los parámetros **y**, **z**, **h** y **t** que describan el resultado.

62. El concepto de matrices *ABCD* se extiende a sistemas más allá de los circuitos eléctricos. Por ejemplo, se usan comúnmente para cálculos de trazado de rayos en sistemas ópticos. En ese caso, se visualizan planos paralelos de entrada y salida en *xy*, atravesados por un eje óptico *z*. Un rayo que entra cruza el plano de entrada a una distancia $x = r_{\text{ent}}$ del eje óptico, formando un ángulo θ_{ent}. Los correspondientes parámetros r_{sal}, θ_{sal} para el rayo que sale cruzando el plano de salida están dados entonces por la matriz *ABCD* de manera que

$$\begin{bmatrix} r_{\text{sal}} \\ \theta_{\text{sal}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{\text{ent}} \\ \theta_{\text{ent}} \end{bmatrix}$$

Cada tipo de elemento óptico (por ejemplo, un espejo, una lente o incluso la propagación en el espacio libre) tiene su propia matriz *ABCD*. Si el rayo pasa a través de varios elementos,

el efecto neto se puede predecir simplemente poniendo en cascada las matrices individuales *ABCD* (en el orden adecuado).

(*a*) Obtenga expresiones para *A, B, C* y *D* similares a las ecuaciones [32] a [35].
(*b*) Si la matriz *ABCD* para un espejo plano con reflexión perfecta está dada por $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, haga un esquema del sistema junto con los rayos entrantes y salientes, teniendo cuidado de observar la orientación del espejo.

63. Continuando el ejercicio 62, el comportamiento de un rayo que se propaga por el espacio libre por una distancia *d* se puede modelar con la matriz *ABCD* $\begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$. (*a*) Demuestre que se obtiene el mismo resultado (r_{sal}, θ_{sal}) si se usa una sola matriz *ABCD* con *d,* que si se usan dos matrices en cascada, cada una con $d/2$. (*b*) ¿Cuáles son las unidades de *A*, *B*, *C* y *D*, respectivamente?

$a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \operatorname{sen} n\omega_0 t)$, donde $a_0 = (1/T)\int_0^T f(t)\,dt$. $a_n = (2/T)\int_0^T f(t)\cos n\omega_0 t\,dt$, y $b_n = (2/T)\int_0^T f(t) \operatorname{sen} n\omega_0 t\,dt$. (Ejemplo 18.1)

- Una función $f(t)$ posee simetría *par* si $f(t) = f(-t)$.
- Una función $f(t)$ tiene simetría *impar* si $f(t) = -f(-t)$.
- Una función $f(t)$ muestra simetría *de media onda* si $f(t) = -f(t - \frac{1}{2}T)$.
- La serie de Fourier de una función par está compuesta sólo por una constante y funciones coseno.
- La serie de Fourier de una función impar se forma sólo por una constante y funciones seno.
- La serie de Fourier de cualquier función que posee simetría de media onda contiene sólo armónicas impares.
- Se podría expresar también la serie de Fourier de una función en forma compleja o exponencial, donde $f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \mathbf{c}_n e^{jn\omega_0 t}$ y $\mathbf{c}_n = (1/T)\int_{-T/2}^{T/2} f(t)e^{-jn\omega_0 t}\,dt$. (Ejemplos 18.3, 18.4)
- La transformada de Fourier permite representar funciones variables en el tiempo en el dominio de la frecuencia, de una manera similar a la de la transformada de Laplace. Las ecuaciones de definición son $\mathbf{F}(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega t} f(t)\,dt$ y $f(t) = (1/2\pi)\int_{-\infty}^{\infty} e^{j\omega t}\mathbf{F}(j\omega)\,d\omega$. (Ejemplos 18.5, 18.6 y 18.7)
- El análisis con transformada de Fourier se puede implementar para analizar circuitos que contengan resistencias, inductores y/o capacitores de manera similar a lo que se hace usando transformadas de Laplace. (Ejemplo 18.8)

LECTURAS ADICIONALES

Un tratamiento muy ameno del análisis de Fourier puede encontrarse en

A. Pinkus y S. Zafrany, *Fourier Series and Integral Transforms*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

Por último, para aquellos interesados en aprender más acerca de la investigación sobre músculos, incluyendo la microscopía electrónica de tejidos, se puede encontrar un excelente tratamiento en

J. Squire, *The Structural Basis of Muscular Contraction*. Nueva York: Plenum Press, 1981.

EJERCICIOS

18.1 Forma trigonométrica de la serie de Fourier

1. Determine la frecuencia fundamental, la frecuencia fundamental en radianes y el periodo de lo siguiente: (*a*) 5 sen 9t; (*b*) 200 cos 70t; (*c*) 4 sen(4t − 10°); (*d*) 4 sen(4t + 10°).
2. Grafique periodos múltiples de la primera, tercera y quinta armónicas, sobre la misma gráfica, de cada una de las siguientes formas de onda (se desean tres gráficas individuales en total): (*a*) 3 sen t; (*b*) 40 cos 100t; (*c*) 2 cos(10t − 90°).
3. Calcule a_0 para lo siguiente: (*a*) 4 sen 4t; (*b*) 4 cos 4t; (*c*) 4 + cos 4t; (*d*) 4 cos(4t + 40°).
4. Calcule a_0, a_1 y b_1 para las siguientes funciones: (*a*) 2 cos 3t; (*b*) 3 − cos 3t; (*c*) 4 sen(4t − 35°).
5. (*a*) Calcule los coeficientes de Fourier a_0, a_1, a_2, a_3, b_1, b_2 y b_3 para la función periódica $f(t) = 2u(t) - 2u(t+1) + 2u(t+2) - 2u(t+3) + \cdots$. (*b*) Grafique $f(t)$ y la serie de Fourier truncada después de $n = 3$ durante 3 periodos.

6. (*a*) Calcule los coeficientes de Fourier a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, b_1, b_2, b_3 y b_4 para la función periódica $g(t)$ parcialmente graficada en la figura 18.28. (*b*) Grafique $g(t)$ junto con la representación de la serie de Fourier truncada después de $n = 4$.

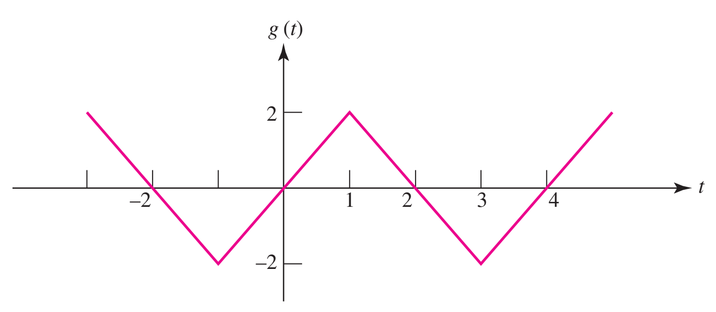


FIGURA 18.28

7. Para la forma de onda periódica $f(t)$ representada en la figura 18.29, calcule a_1, a_2, a_3 y b_1, b_2, b_3.

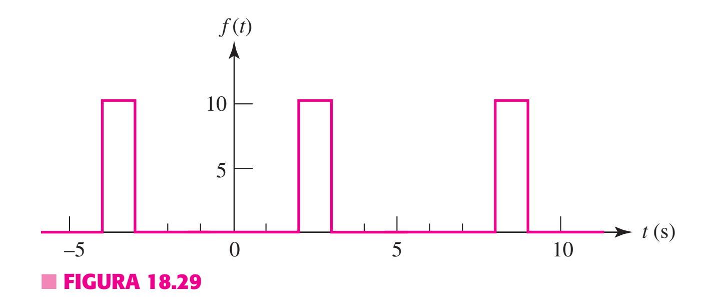


FIGURA 18.29

8. Con referencia a la forma de onda periódica dibujada en la figura 18.29, suponga que $g_n(t)$ es la representación de la serie de Fourier de $f(t)$ truncada en n. [Por ejemplo, si $n = 1$, $g_1(t)$ tiene tres términos, definidos a través de a_0, a_1 y b_1.] (*a*) Grafique un esquema de $g_2(t)$, $g_3(t)$ y $g_5(t)$, junto con $f(t)$. (*b*) Calcule $f(2.5)$, $g_2(2.5)$, $g_3(2.5)$ y $g_5(2.5)$.
9. Respecto a la forma de onda periódica $g(t)$ dibujada en la figura 18.28, defina $y_n(t)$, como la representación de la serie Fourier truncada en n. (Por ejemplo, $y_2(t)$ tiene cinco términos, definidos a través de a_0, a_1, a_2, b_1 y b_2.) (*a*) Grafique un esquema de $y_3(t)$ y $y_5(t)$, junto con $g(t)$. Calcule $y_1(0.5)$, $y_2(0.5)$, $y_3(0.5)$ y $g(0.5)$.
10. Determine expresiones para a_n y b_n para $g(t - 1)$ si la forma de onda periódica $g(t)$ se define como se grafica en la figura 18.28.
11. Grafique el espectro de líneas (limitado a los seis términos mayores) para la forma de onda que se muestra en la figura 18.4*a*.
12. Grafique el espectro de líneas (limitado a los seis términos mayores) para la forma de onda de la figura 18.4*b*.
13. Grafique el espectro de líneas (limitado a los seis términos mayores) para la forma de onda representada por la gráfica de la figura 18.4*c*.

18.2 El uso de la simetría

14. Diga si lo siguiente muestra simetría impar, simetría par y/o simetría de media onda: (*a*) 4 sen 100*t*; (*b*) 4 cos 100*t*; (*c*) 4 cos(4*t* + 70°); (*d*) 4 cos 100*t* + 4; (*e*) cada forma de onda en la figura 18.4.
15. Determine si lo siguiente muestra simetría impar, simetría par y/o simetría de media onda: (*a*) la forma de onda en la figura 18.28; (*b*) $g(t - 1)$, si $g(t)$ está representada en la figura

18.28; (*c*) $g(t+1)$, si $g(t)$ está representada en la figura 18.28; (*d*) la forma de onda de la figura 18.29.

16. La forma de onda no periódica $g(t)$ se define en la figura 18.30. Úsela para crear una nueva función $y(t)$ tal que $y(t)$ sea idéntica a $g(t)$ dentro del intervalo $0 < t < 4$ y también se caracterice por un periodo $T = 8$ y tenga (*a*) simetría impar; (*b*) simetría par; (*c*) tanto simetría impar como simetría de media onda.

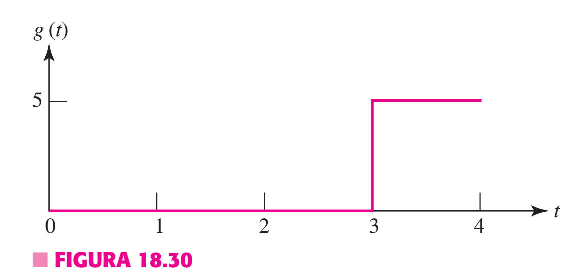


FIGURA 18.30

17. Calcule a_0, a_1, a_2, a_3 y b_1, b_2, b_3 para la forma de onda periódica $v(t)$ representada en la figura 18.31.

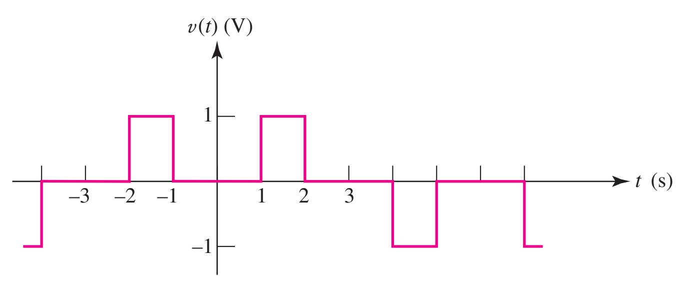


FIGURA 18.31

DP 18. La forma de onda de la figura 18.31 se corre para crear una nueva forma de onda tal que $v_{\text{nueva}}(t) = v(t+1)$. Calcule a_0, a_1, a_2, a_3 y b_1, b_2, b_3.

19. Diseñe una forma de onda triangular que tenga una magnitud pico de 3, un periodo de 2 s y se caracterice por (*a*) simetría de media onda y par; (*b*) simetría de media onda e impar.

20. Recurra lo más posible a la simetría para obtener valores numéricos correspondientes a a_0, a_n y b_n, $1 \le n \le 10$, para la forma de onda de la figura 18.32.

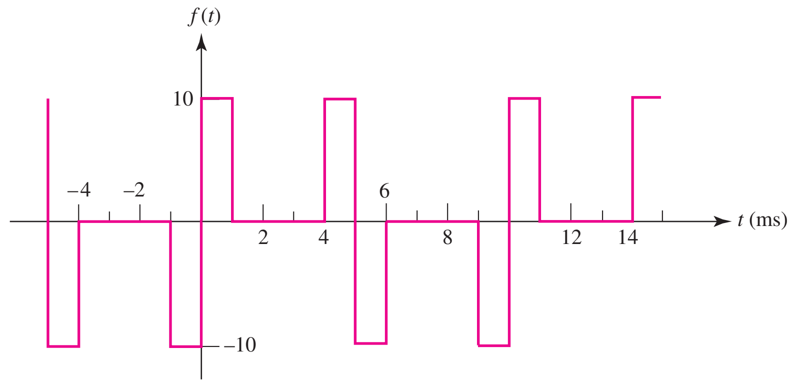


FIGURA 18.32

18.3 Respuesta completa a funciones forzadas periódicas

21. Para el circuito de la figura 18.33*a*, calcule $v(t)$ si $i_s(t)$ está dada por la figura 18.33*b* y $v(0) = 0$.

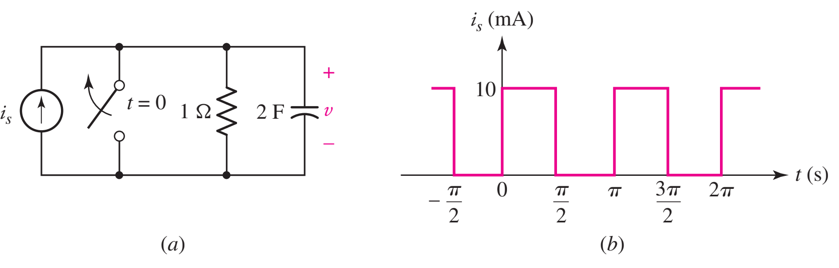


FIGURA 18.33

22. Si la forma de onda que se muestra en la figura 18.34 se aplica al circuito de la figura 18.8*a*, calcule $i(t)$.

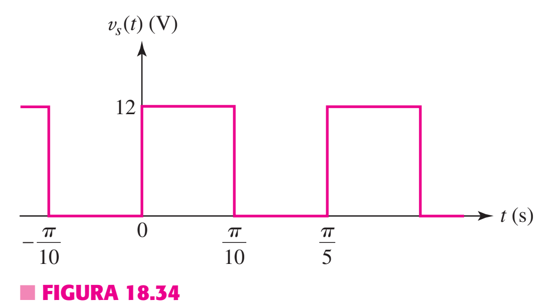


FIGURA 18.34

23. El circuito de la figura 18.35*a* se encuentra sujeto a la forma de onda que se muestra en la figura 18.35*b*. Determine la tensión $v(t)$ en estado estable.

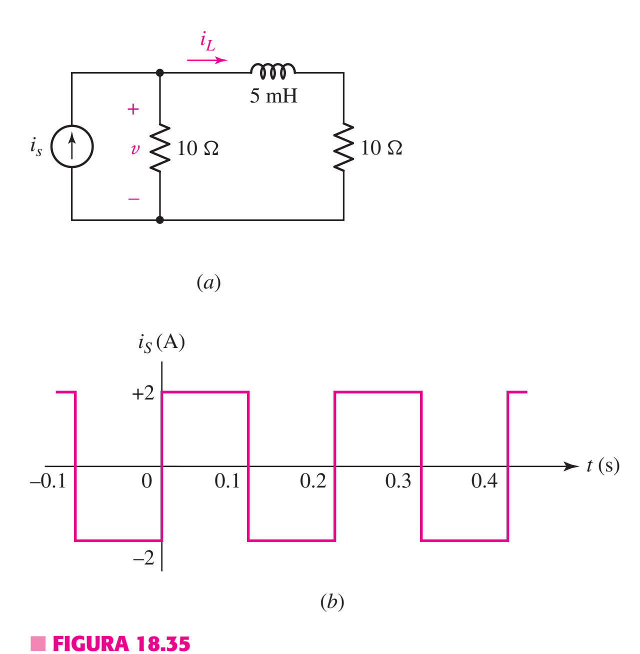


FIGURA 18.35

24. Aplique la forma de onda de la figura 18.36 al circuito de la figura 18.35*b* y calcule la corriente de estado estable $i_L(t)$.

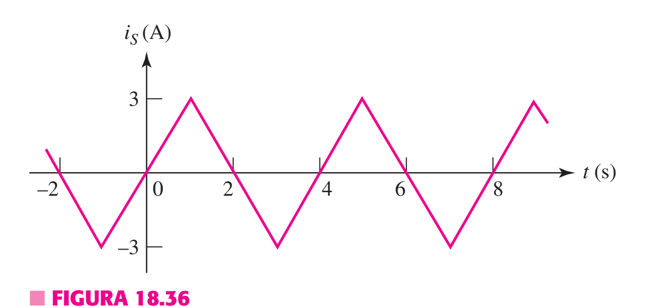


FIGURA 18.36

25. Si la forma de onda de corriente de la figura 18.36 se aplica al circuito de la figura 18.33*a*, calcule la tensión de estado estable $v(t)$.

18.4 Forma compleja de la serie de Fourier

26. Suponga que la función $v(t)$ se define como se indica en la figura 18.10. Determine $\mathbf{c}_n$ para (*a*) $v(t + 0.5)$; (*b*) $v(t - 0.5)$.
27. Calcule $\mathbf{c}_0$, $\mathbf{c}_{\pm 1}$ y $\mathbf{c}_{\pm 2}$ para la forma de onda de la figura 18.36.
28. Determine los primeros cinco términos de la representación de la serie exponencial de Fourier de la forma de onda graficada en la figura 18.33*b*.
29. Para la forma de onda periódica que se muestra en la figura 18.37, determine (*a*) el periodo T; (*b*) $\mathbf{c}_0$, $\mathbf{c}_{\pm 1}$, $\mathbf{c}_{\pm 2}$ y $\mathbf{c}_{\pm 3}$.

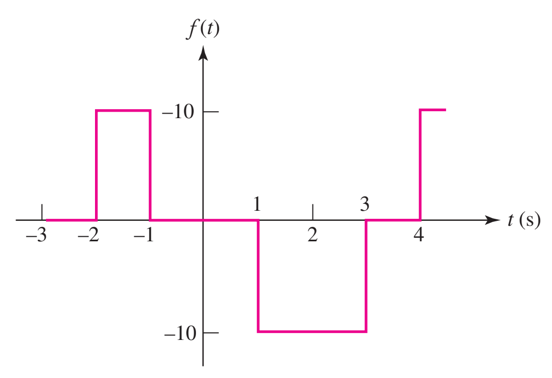


FIGURA 18.37

30. Para la forma de onda periódica representada en la figura 18.38, calcule (*a*) el periodo T; (*b*), $\mathbf{c}_0$, $\mathbf{c}_{\pm 1}$, $\mathbf{c}_{\pm 2}$ y $\mathbf{c}_{\pm 3}$.

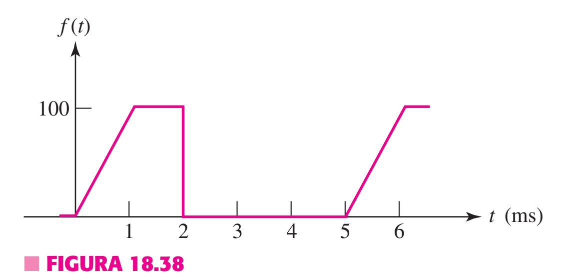
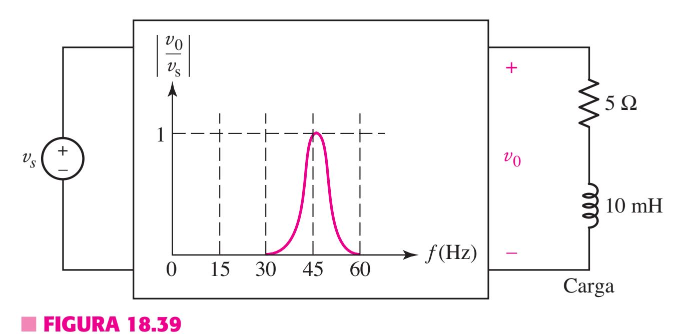


FIGURA 18.38

31. Una secuencia de pulsos tiene un periodo de 5 μs, una amplitud unitaria de $-0.6 < t < -0.4$ μs y de $0.4 < 1 < 0.6$ μs, así como amplitud cero en cualquier otro lado del intervalo del periodo. Esta serie de pulsos podría representar el número decimal 3 que se está transmitiendo en forma binaria mediante una computadora digital. (*a*) Determine $\mathbf{c}_n$. (*b*) Calcule $\mathbf{c}_4$. (*c*) Calcule $\mathbf{c}_0$. (*d*) Calcule $|\mathbf{c}_n|_{\text{máx}}$. (*e*) Obtenga N de manera que $|\mathbf{c}_n| \leq 0.1|\mathbf{c}_n|_{\text{máx}}$ para toda $n > N$. (*f*). ¿Qué ancho de banda se requiere para transmitir esta parte del espectro?
32. Sea una tensión periódica $v_s(t) = 40$ V para $0 < t < \frac{1}{96}$ s, y 0 para $\frac{1}{96} < t < \frac{1}{16}$ s. Si $T = \frac{1}{16}$ s, calcule: (*a*) $\mathbf{c}_3$; (*b*) la potencia entregada a la carga en el circuito de la figura 18.39.



■ **FIGURA 18.39**

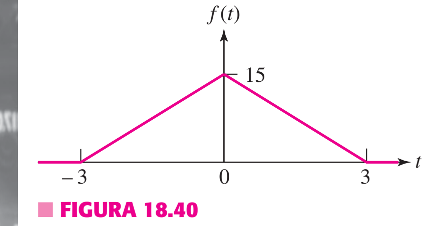
18.5 Definición de la transformada de Fourier

33. Dado

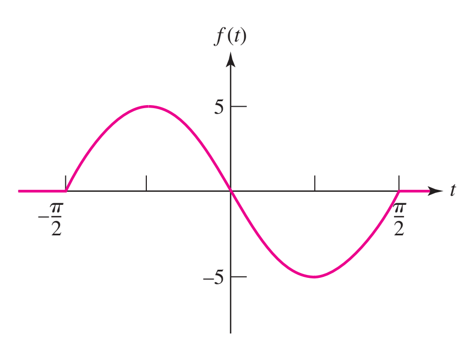
$$g(t) = \begin{Bmatrix} 5 & -1 < t < 1 \\ 0 & \text{otro} \end{Bmatrix}$$

grafique (*a*) de $g(t)$; (*b*) de $\mathbf{G}(j\omega)$.

34. Para la función $v(t) = 2u(t) - 2u(t+2) + 2u(t+4) - 2u(t+6)$ V, grafique (*a*) $v(t)$; (*b*) $\mathbf{V}(j\omega)$.
35. Use la ecuación [46*a*] para calcular $\mathbf{G}(j\omega)$ si $g(t)$ es (*a*) $5e^{-t}u(t)$; (*b*) $5te^{-t}u(t)$.
36. Obtenga la transformada de Fourier $\mathbf{F}(j\omega)$ del pulso triangular graficado en la figura 18.40.
37. Determine la transformada de Fourier $\mathbf{F}(j\omega)$ de la onda sinusoidal que se muestra en la figura 18.41.



■ **FIGURA 18.40**



■ **FIGURA 18.41**

18.6 Algunas propiedades de la transformada de Fourier

38. Para $g(t) = 3e^{-t}u(t)$, calcule (*a*) $\mathbf{G}(j\omega)$; (*b*) $\mathbf{A}_g(1)$; (*c*) $\mathbf{B}_g(1)$; (*d*) $\phi(\omega)$.
39. El pulso de tensión $2e^{-t}u(t)$ V se aplica a la entrada de un filtro pasabanda ideal. El pasabanda del filtro se define por $100 < |f| < 500$ Hz. Calcule la energía de salida total.

40. Dado que $v(t) = 4e^{-|t|}$ V, calcule el rango de frecuencia en el que está el 85% de la energía de 1 Ω.

41. Calcule la energía de 1 Ω correspondiente a la función $f(t) = 4te^{-3t}u(t)$.

42. Use la definición de la transformada de Fourier para demostrar los siguientes resultados, donde $\mathcal{F}\{f(t)\} = \mathbf{F}(j\omega)$: (*a*) $\mathcal{F}\{f(t - t_0)\} = e^{-j\omega t0}\,\mathcal{F}\{f(t)\}$; (*b*) $\mathcal{F}\{df(t)/dt\} = j\omega\,\mathcal{F}\{f(t)\}$; (*c*) $\mathcal{F}\{f(kt)\} = (1/|k|)\,\mathbf{F}(j\omega/k)$; (*d*) $\mathcal{F}\{f(-t)\} = \mathbf{F}(-j\omega)$; (*e*) $\mathcal{F}\{tf(t)\} = j\,d\,[\mathbf{F}(j\omega)]/d\omega$.

18.7 Pares de transformadas de Fourier de algunas funciones del tiempo simples

43. Determine la transformada de Fourier de lo siguiente: (*a*) $5u(t) - 2\,\mathrm{sgn}(t)$; (*b*) $2\cos 3t - 2$; (*c*) $4e^{-j3t} + 4e^{j3t} + 5u(t)$.

44. Encuentre la transformada de Fourier de cada una de las siguientes expresiones: (*a*) $85u(t + 2) - 50u(t - 2)$; (*b*) $5\delta(t) - 2\cos 4t$.

45. Grafique $f(t)$ y $|\mathbf{F}(j\omega)|$ si $f(t)$ está dada por (*a*) $2\cos 10t$; (*b*) $e^{-4t}u(t)$; (*c*) $5\,\mathrm{sgn}(t)$.

46. Determine $f(t)$ si $\mathbf{F}(j\omega)$ está dada por (*a*) $4\delta(\omega)$; (*b*) $2/(5\,000 + j\omega)$; (*c*) $e^{-j120\omega}$.

47. Obtenga una expresión para $f(t)$ si $\mathbf{F}(j\omega)$ está dada por

$$(a)\; -j\frac{231}{\omega};\; (b)\; \frac{1 + j2}{1 + j4};\; (c)\; 5\delta(\omega) + \frac{1}{2 + j10}.$$

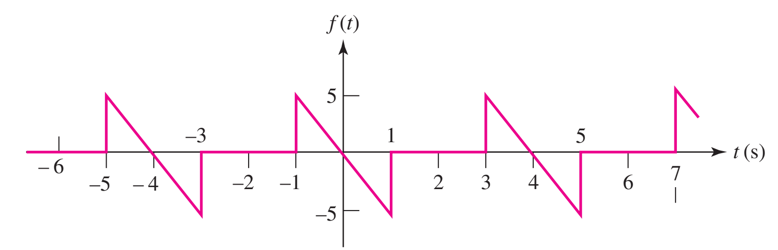
18.8 Transformada de Fourier de una función del tiempo periódica general

48. Calcule la transformada de Fourier de las siguientes funciones: (*a*) $2\cos^2 5t$; (*b*) $7\,\mathrm{sen}\,4t\cos 3t$; (*c*) $3\,\mathrm{sen}(4t - 40°)$

49. Determine la transformada de Fourier de la función periódica $g(t)$ que está definida dentro del intervalo $0 < t < 10$ s por $g(t) = 2u(t) - 3u(t - 4) + 2u(t - 8)$.

50. Si $\mathbf{F}(j\omega) = 20\sum_{n=1}^{\infty}[1/(|n|! + 1)]\delta(\omega - 20n)$, encuentre el valor de $f(0.05)$.

51. Dada la forma de onda periódica que se muestra en la figura 18.42, determine su transformada de Fourier.



■ **FIGURA 18.42**

18.9 Función del sistema y respuesta en el dominio de la frecuencia

52. Si un sistema está descrito por la función de transferencia $h(t) = 2u(t) + 2u(t - 1)$, use convolución para calcular la salida (en dominio de tiempo) si la entrada es (*a*) $2u(t)$; (*b*) $2te^{-2t}u(t)$.

53. Dada la función de entrada $x(t) = 5e^{-5t}u(t)$, use convolución para obtener una salida en el dominio de tiempo si la función de transferencia del sistema $h(t)$ está dada por (*a*) $3u(t + 1)$; (*b*) $10te^{-t}u(t)$.

54. (*a*) Diseñe un amplificador no inversor que tenga una ganancia de 10. Si el circuito se construye usando un amp op μA741 alimentado por fuentes de ±15 V, determine la TRF de la salida mediante simulaciones adecuadas si la tensión de entrada opera a 1 kHz y tiene magnitud (*b*)10 mV; (*c*) 1 V; (*d*) 2 V.



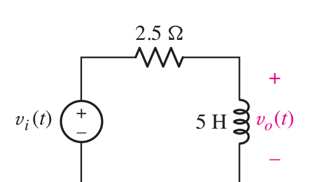
55. (*a*) Diseñe un amplificador inversor que tenga una ganancia de 5. Si el circuito se construye usando un amp op μA741 alimentado por fuentes de ±10 V, realice simulaciones



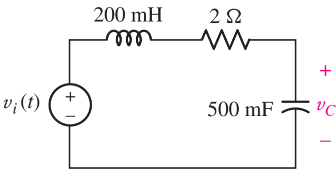
adecuadas para determinar la TRF de la tensión de salida si la tensión de entrada tiene una frecuencia de 10 kHz y magnitud (*b*) 500 mV; (*c*) 1.8 V; (*d*) 3 V.

18.10 Significado físico de la función del sistema

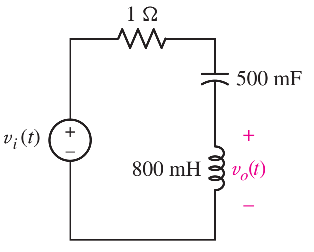
56. Con referencia al circuito de la figura 18.43, calcule $v_o(t)$ usando técnicas de Fourier si $v_i(t) = 2te^{-t}u(t)$ V.
57. Después de que el inductor de la figura 18.43 se reemplaza clandestinamente por un capacitor de 2 F, calcule $v_o(t)$ usando técnicas de Fourier si $v_i(t)$ es igual a (*a*) $5u(t)$ V; (*b*) $3e^{-4t}u(t)$ V.
58. Use técnicas basadas en Fourier para calcular $v_C(t)$ marcada en la figura 18.44 si $v_i(t)$ es igual a (*a*) $2u(t)$ V; (*b*) $2\delta(t)$ V.
59. Use técnicas basadas en Fourier para calcular $v_o(t)$ marcada en la figura 18.45 si $v_i(t)$ es igual a (*a*) $5u(t)$ V; (*b*) $3\delta(t)$ V.
60. Use técnicas basadas en Fourier para calcular $v_o(t)$ marcada en la figura 18.45 si $v_i(t)$ es igual a (*a*) $5u(t-1)$ V; (*b*) $2 + 8e^{-t}u(t)$ V.



■ FIGURA 18.43



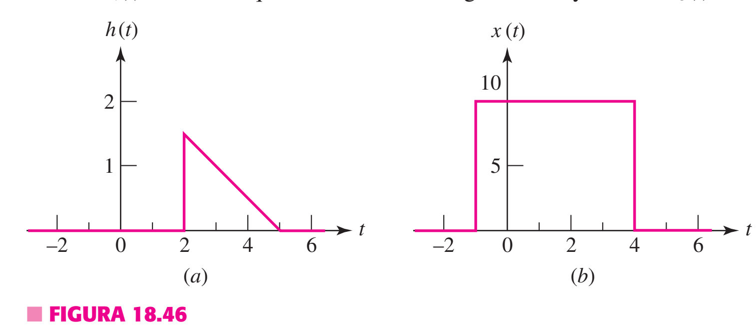
■ FIGURA 18.44



■ FIGURA 18.45

Ejercicios de integración del capítulo

61. Aplique el pulso cuya forma de onda se muestra en la figura 18.46*a* como la tensión de entrada $v_i(t)$ al circuito que se muestra en la figura 18.44 y calcule $v_C(t)$.



■ FIGURA 18.46

62. Aplique el pulso cuya forma de onda se muestra en la figura 18.46*b* como la tensión de entrada $v_i(t)$ al circuito que se muestra en la figura 18.44 y calcule $v_C(t)$.
63. Aplique el pulso cuya forma de onda se muestra en la figura 18.46*a* como la tensión de entrada $v_i(t)$ al circuito que se muestra en la figura 18.44 y calcule $i_C(t)$, definida de acuerdo con la convención pasiva de signos.
64. Aplique el pulso cuya forma de onda se muestra en la figura 18.46*b* como tensión de entrada $v_i(t)$ al circuito que se muestra en la figura 18.45 y calcule $v_o(t)$.
65. Aplique el pulso cuya forma de onda se muestra en la figura 18.46*b* como la tensión de entrada $v_i(t)$ al circuito que se muestra en la figura 18.45 y calcule $v_o(t)$.